

**EFFECTO CICLOS DE HUMEDECIMIENTO/SECADO Y
CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO EN LA RESISTENCIA GEOMECÁNICA DE
LAS ROCAS LODOSAS, FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL**

CAMILO ANDRÉS CHAPARRO BARRERA



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE POSGRADOS – MAESTRÍA EN GEOTÉCNIA
TUNJA
2019**

**EFFECTO CICLOS DE HUMEDECIMIENTO/SECADO Y
CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO EN LA RESISTENCIA GEOMECÁNICA DE
LAS ROCAS LODOSAS, FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL**

CAMILO ANDRES CHAPARRO BARRERA

Monografía para optar el título de Magíster en Geotecnia

Director

**Omar Javier Jiménez Jiménez
MSc. IC - Geotecnia**

Codirector

**Jairo Martín Espitia
PhD. IC - Geotecnia**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE POSGRADOS – MAESTRÍA EN GEOTECNIA
TUNJA
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Jurado

Firma Jurado

Firma Director del Proyecto

Firma Co-director del Proyecto

Firma Director Posgrados
Facultad de Ingeniería

Tunja, octubre de 2019

DEDICACIÓN

A Dios por darme la sabiduría de enfrentar las dificultades que se presentaban en el día a día, tanto en el ambiente laboral como académico y poder responder con mis obligaciones. A los docentes, Director y Co-director que con su conocimiento y aportes contribuyeron a desarrollar este trabajo investigativo. A mi madre Elizabeth Barrera Castañeda por su apoyo incondicional, finalmente a Amanda Cárdenas, Andrea Egli y la familia Pino Mariño, por su constante acompañamiento.

Camilo Ch.

**La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma.
Por lo tanto, no se hace responsable por las opiniones aquí expuestas.
“Se autoriza su reproducción indicando su origen”**

TABLA CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN.....	13
1. JUSTIFICACIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	16
3. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	17
3.1 LOCALIZACIÓN GENERAL.....	17
2.2 LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL.	18
2.2.1 Formación Lutitas de Macanal (Kilm)	19
2.2.2 Falla regional.....	20
2.3 LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA LOCAL.....	20
2.3.1 Lutitas de Macanal Conjunto A (Kilm A)	20
2.3.2 Lutitas de Macanal Conjunto B (Kilm B)	20
2.3.3 Lutitas de Macanal Conjunto C (Kilm C).....	20
2.3.4 Lutitas de Macanal Conjunto D (Kilm D)	21
2.3.5 Fallas locales	21
2.4 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	23
2.4.1 Datos de Campo.	23
2.4.2 Caracterización del macizo rocoso	23
2.5 CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA	27
2.5.1 Temperatura.....	28
2.5.2 Humedad Relativa (HR)	28
2.5.3 Precipitaciones.	29
3. MARCO REREFENCIAL	31
3.1 MARCO TEÓRICO	31
3.1.1 Características de las Rocas Lodosas.....	31
3.1.2 Aspectos teóricos de los cambios de humedad.	34
3.2 MARCO REFERENCIAL	42
3.2.1 Procesos que afectan las rocas lodosas	43
3.2.2 Efecto de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento en rocas.	44
4. ETAPA PRE-EXPERIMENTAL	49
4.1 MUESTREO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	49
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA LODOSA.....	50
4.2.1 Propiedades físicas	50
4.2.2 Propiedades mineralógicas	52
4.3 PRE-ENSAYOS PARA CICLOS DE HUMEDECIMIENTO/SECADO Y CALENTAMIENTO ENFRIAMIENTO	56

4.4	CARACTERIZACIÓN E INCIDENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LA RESISTENCIA DE LA ROCAS LODOSAS.....	60
4.4.1	Medición de la succión ante el cambio de humedad en la roca lodosa. ...	61
4.4.2	Influencia de la Humedad (ω) en la Resistencia a la Compresión Uniaxial (σ_c).	64
5	DISEÑO Y MONTAJE EXPERIMENTAL	66
5.1	Selección del material de referencia	66
5.2	Montaje experimental de laboratorio	66
5.2.1	Tratamiento humedecimiento/secado (H-S)	66
5.2.2	Tratamiento Calentamiento/enfriamiento (C-E)	67
5.2.3	Tratamiento simultáneos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E).	68
5.3	Diseño experimental	70
5.3.1	Variables del diseño experimental y distribución de la muestra	71
6	RESULTADOS CAMBIOS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA	72
6.1	CAMBIOS DE HUMEDAD EN TRATAMIENTOS.....	72
6.2	RESULTADOS DE REFERENCIA.....	73
6.3	RESULTADOS DE TRATAMIENTO PARA CAMBIOS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA.....	73
6.3.1	Análisis cualitativo de los efectos de los cambios de humedad y temperatura.....	73
6.3.2	Resultados de cuantitativos de los cambios de humedad y temperatura ..	75
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
8	BIBLIOGRAFÍA.....	84
	ANEXOS.....	89

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización general del sitio de estudio	18
Figura 2. Geología regional del sitio de estudio	19
Figura 3. Intercalación de las Lutitas de Macanal C(Kilm C) PR 63+850 Ruta 6211.	21
Figura 4. Geología local y sitio de estudio	22
Figura 5. Caracterización geológica de la roca lodosa en el sitio de estudio. Formación Kilm – miembro C	24
Figura 6. Carta para evaluación el índice de resistencia geológica (GSI) del macizo rocoso fracturado objeto de estudio	25
Figura 7. Montaje experimental para imposición de succión controlada en muestra de ensayo	37
Figura 8. Cambio de la humedad relativa frente a la temperatura para diversas soluciones salinas.....	39
Figura 9. Método de papel filtro en contacto y sin contacto para medir la succión matricial y total, respectivamente.....	41
Figura 10. Extracción cilindros de roca. (a) bloque-campo, (b) Núcleos-laboratorio	49
Figura 11. Proceso de degradación de 6 fragmentos de roca lodosa.	51
Figura 12. Elaboración de sección delgada de roca lodosa. (a) Preparación de muestra en lamina, (b) pulido hasta obtener sección delgada de 20 μm , (c) sección delgada.....	52
Figura 13. Fotografías ópticas de las secciones delgadas de una roca lodosa ...	53
Figura 14. Condiciones geométricas para la difracción de rayos X según la ley de Bragg.....	55
Figura 15. Grafica completa de la roca en estudio, y el porcentaje de minerales	55
Figura 16. Registro de temperatura con termómetro laser a) mínima y b) máxima	56
Figura 17. Imposición de ambiente controlado con Técnica de Equilibrio de Vapor VET. (a) preparación solución salina, (b) Equilibrio de vapor en recipiente hermético con dato de termohigrómetro	58
Figura 18. Curva de variabilidad de la HR con respecto a la temperatura para las tres concentraciones de CaCl_2 que cumplieron con el objeto del estudio	59
Figura 19. Variación del peso normalizado con respecto al tiempo. (a) Usando CaCl_2 , (b) de rama seca a rama húmeda usando NaCl	60
Figura 20. Proceso de medición de succión con método de papel filtro Newmat 42. (a) Colocación de papel filtro entre muestra y disco de teflón, (b) muestra envuelta y presionada, (c) control y aislamiento de muestra	62
Figura 21. Proceso de medición de succión con método de papel filtro Newmat 42. (a) Secado de papel filtro en horno, (b) balanza de precisión para toma de peso húmedo y seco del papel filtro.....	62

Figura 22. Curva de retención de agua CRA en la rama húmeda de la roca lodosa de formación Lutitas de Macanal.....	63
Figura 23. Cambio de la Resistencia a la Compresión Uniaxial con la humedad en la roca lodosa.	65
Figura 24. Diagrama del tratamiento de humedecimiento/secado (H-S)	67
Figura 25. Esquema tratamiento de Calentamiento/enfriamiento (C-E)	68
Figura 26. Esquema tratamiento simultáneo de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E).....	69
Figura 27. Montaje con recipientes herméticos para el control de la humedad en la rama seca (HR de 44%), con cambios de temperatura (8° C a 52° C)	70
Figura 28. Variación de humedad en rocas lodosa ante cada tratamiento y ciclo.	72
Figura 29. Aumento de las fisuras con los cambios de temperatura. (a) calentamiento/enfriamiento, (b) simultáneo humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento, (c) humedecimiento/secado.....	74
Figura 30. Curva promedio tratamiento calentamiento/enfriamiento- ciclo 1	76
Figura 31. Grafica Resistencia a la Compresión Uniaxial vs Deformación Unitaria.	77
Figura 32. Aumento del porcentaje de degradación en cada tratamiento con el número de ciclos. (a) Degradación de la Resistencia a la Compresión Uniaxila y (b) degradación del Módulo de Young	78
Figura 33. Valor promedio de E_t y σ_c para los tratamientos de humedecimiento/secado (H-S), calentamiento/enfriamiento (C-E) y simultáneo de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E), ciclo 1 y 2	79

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Localización general del punto de estudio, coordenadas geográficas y planas (origen centro)	17
Tabla 2. Lectura de matillo de Schmitd	23
Tabla 3. Valores estructurales del macizo rocoso en campo	26
Tabla 4. Evaluación del macizo rocoso por RMR	27
Tabla 5. Estaciones meteorológicas aledañas al sitio de estudio	28
Tabla 6. Variación de la temperatura en la estación Corinto	28
Tabla 7. Valores de HR de la estación Corinto	29
Tabla 8. Valores de precipitación (mm) en la región	29
Tabla 9. Clasificación de rocas lodosas petrográficamente	33
Tabla 10. Propiedades de soluciones Saturadas	38
Tabla 11. Curvas de calibración del papel filtro Whatman 42	41
Tabla 12. Resultados promedio de las propiedades físicas de la roca lodosa	50
Tabla 13. Tamaño y porcentaje distribuido en la sección delgada	54
Tabla 14. Soluciones salinas utilizadas en el proyecto	58
Tabla 15. Resultados de succión con papel filtro, en muestras de roca lodosa	62
Tabla 16. Resistencia a la Compresión Uniaxial, humedad y saturación en testigos de rocas lodosas, formación Lutitas de Macanal	64
Tabla 17. Descripción de las variables dependientes e independientes	71
Tabla 18. Distribución del número de especímenes de roca lodosa, por tratamiento y ciclos	71
Tabla 19. Resultados testigos de referencia (Ref_)	73
Tabla 20. Resumen de los resultados de los ensayos de resistencia a las compresión uniaxial en tratamientos y ciclos impuestos a la roca lodosa	75
Tabla 21. Resultados resumen de los tratamientos y ciclos	76
Tabla 22. Degradación de la resistencia de la rocas lodosas antes ciclos y tratamientos de H-S, C-E y simultaneo de H-S y C-E, respecto a la referencia. ..	77

EFFECTO DE LOS CICLOS DE HUMEDECIMIENTO/SECADO Y CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO EN EL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LAS ROCAS LODOSAS, FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL

RESUMEN

Las rocas lodosas son materiales susceptibles a la intemperie, una condición intrínseca de la mineralogía y formación sedimentaria. En la cordillera Oriental de los Andes Colombianos yace superficialmente este material rocoso, lo que implica la degradación de las propiedades físicas y mecánicas ante factores medioambientales, como los cambios de humedad y temperatura que se propician intensivamente en el clima tropical de la región, factores no considerados en el diseño de obras civiles. El presente estudio determina un procedimiento experimental en laboratorio para reproducir el efecto de los ciclos de humedecimiento/secado (H-S) y calentamiento/enfriamiento (C-E) en condiciones y periodos similares a los originales de los geomateriales, mediante la Técnica de Equilibrio de Vapor (VET) y cambio térmico, los procesos se realizaron sobre núcleos de roca extraídos de la formación Lutitas de Macanal que aflora en el municipio de Pajarito-Boyacá, sector Ranchería. Los resultados determinaron cuantitativamente la degradación del Modulo de Young y la Resistencia a la Compresión Uniaxial con los tratamientos aplicados, teniendo mayor efecto en los ciclos de C-E en un periodo igual al de H-S, generando mayor perjuicio a la roca debido al fisuramiento pronunciado.

Palabras clave: rocas lodosas, técnica equilibrio de vapor, Resistencia Compresión Uniaxial, humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento.

EFFECT OF WETTING/DRYING AND HEATING/COOLING CYCLES ON GEOMECHANICAL BEHAVIOUR OF MUDROCKS IN THE LUTITAS DE MACANAL FORMATION

ABSTRACT.

The mudrocks are weatherable materials, an intrinsic condition of mineralogy and sedimentary formation. In the Eastern Cordillera of the Colombian Andes lies this rocky material, which implies the degradation of physical and mechanical properties in the face of environmental factors, such as changes in humidity and temperature that are intensively propitiated in the tropical climate of the region, factors not considered in the design of civil works. The present study determines an experimental procedure in laboratory to reproduce the effect of the cycles of wetting/drying (W-D) and heating/cooling (H-C) in conditions and periods similar to the original ones of the geomaterials, by means of the Vapor Equilibrium Technique (VET) and thermal change, the processes were carried out on rock cores extracted from the Lutitas de Macanal formation that emerges in the municipality of Pajarito-Boyacá, Rancheria sector. The results quantitatively determined the degradation of Young's Module and the Resistance to Uniaxial Compression with the applied treatments, having a greater effect on the H-C cycles in a period equal to that of W-D generating greater damage to the rock due to pronounced

Key Words: mudrock, vapor equilibrium technique, Resistance to Uniaxial Compression, wetting/drying y heating/cooling.

INTRODUCCIÓN

Las rocas lodosas son geomateriales conocidos como shales de compactación desarrollados durante las presiones diagenéticas, principalmente porque ha soportado el peso de sedimentos suprayacentes, es decir; estas rocas poseen una cementación deficiente o inexistente y se deterioran muy rápidamente una vez expuestos a los agentes atmosféricos. Torres (2011)¹, Indicó que es común identificar a los shales de cementación como del tipo roca y a los shales de compactación como del tipo suelo.

Por su parte Tarbuck (1998)², explicó que las partículas de estas rocas son tan pequeñas que no pueden identificarse con facilidad y, por esta razón, estas rocas son de calidad inferior dentro del conjunto de las rocas sedimentarias, sus propiedades no son caracterizadas y correlacionadas de forma satisfactoria, dado su tamaño de partículas y su carácter microscópico, siendo difíciles de explorar, muestrear y ensayar. Las rocas lodosas con la misma descripción de composición mineralógica pueden tener resultados muy variables, ya que están íntimamente ligadas a la génesis de formación y la composición microestructura. Entre este conjunto se identifica la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal.

Los estudios previos han identificado que los cambios de humedad y temperatura generan degradación de propiedades físicas y mecánicas de las rocas, pero esta evaluación en muchos casos se realiza con métodos como la saturación y secado rápido al horno que implican cambios violentos en las condiciones de las muestras, para las rocas lodosas los anteriores procedimientos de laboratorio no son representativos ni aplicables. Considerando lo anterior, el presente texto tiene como objetivo determinar el efecto de la reproducción en laboratorio de los agentes medioambientales como los ciclos de humedecimiento-secado (W-D) y calentamiento-enfriamiento (H-C), teniendo en cuenta los respectivos periodos de tiempo en que estos factores influyen en el sitio de estudio.

La desintegración y/o descomposición de los materiales rocosos en superficie son procesos de meteorización que están controlados por la condición variables del clima como la temperatura y humedad, produciendo la fracturación mecánica de la roca. La caracterización de los efectos de la meteorización física como la humedad en las rocas, son estudiados habitualmente con procesos de saturación por inmersión y secado rápido al horno. Adicionalmente, otras investigaciones

¹ TORRES Mario. Tesis de doctorado en ingeniería- geotecnia. Efecto de los ciclos de carga-descarga y humedecimiento- secado en el comportamiento geomecánico de rocas lodosas de los Andes Colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2011, pp I-16

² TARBUCK. Ciencias de la Tierra, Rocas sedimentarias. BLS, 1998, p. 204-205

están orientadas a los cambios bruscos de ambiente de ciclos de humedecimiento-secado (H-S), calentamiento-enfriamiento (C-E) y congelamiento-descongelamiento.

1. JUSTIFICACIÓN

La investigación científica del comportamiento mecánico y en particular la degradación de los geo-materiales, tradicionalmente ha tropezado en la forma idónea de escalar los efectos de los factores medioambientales, que condicionan dicho comportamiento y su respuesta a partir de muestras que resulten representativas del medio físico en consideración.

El material objeto de estudio es una roca sedimentaria conformada esencialmente por partículas de tamaño microscópico, que presenta características de degradabilidad propias asociada a la composición química y mineralógica, su estructura es meta-estable y su resistencia se debe principalmente a que ha soportado peso de sedimentos supra yacentes. Adicionalmente, en la zona donde aflora la roca descrita, está sometida a un clima tropical donde se demarcan temporadas de fuerte lluvias y otra de bajas o nulas, las características descritas enfrentan dos escenarios referentes a la constitución del material y el efecto de los agentes ambientales que se ven sometidos.

Es necesario completar la información existente de las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal, además de analizar el comportamiento mecánico de la roca ante procesos de meteorización que aceleran la pérdida de competencia mecánica en estos geo-materiales, como lo son los cambios de humedad y temperatura. Dichos procesos son complejos en su modelación; por lo tanto, se requiere de un programa de experimentación que atienda los fenómenos asociados con variables que se aproximen a las exhibidas en campo.

El municipio de Pajarito Boyacá es una zona de extrema importancia para la ejecución de proyectos de infraestructura civil, que comprometen el desarrollo del interior del país y los llanos orientales. La roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal es responsable de numerosas problemas de estabilidad en trabajos de ingeniería, se considera que dentro de los mecanismos que más inciden en el deterioro de las propiedades mecánicas de estos geo-materiales se destacan los ciclos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento.

La investigación da a conocer el desarrollo metodológico en laboratorio para abordar la degradación de la resistencia mecánica de las rocas lodosas, reconociendo el impacto que genera los cambios de humedad y temperatura en las rocas que se ven expuestas al medio ambiente.

2. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Determinar experimentalmente el efecto de los cambios de humedad y temperatura en el comportamiento geomecánico de las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal en Pajarito Boyacá.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las características geológicas y tectónicas de los afloramientos de la columna estratigráfica D3 de la formación Lutitas de Macanal (Kilm) en el área de estudio.
- Explorar en Pajarito Boyacá la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal, que se ve expuesta a las acciones meteorizantes de los cambios de humedad y temperatura.
- Caracterizar en laboratorio las propiedades física, química y mecánicas de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal que aflora en Pajarito Boyacá.
- Aplicar ciclos de Humedecimiento/secado mediante la técnica de equilibrio de vapor y ciclos de enfriamiento/calentamiento a temperaturas equivalentes a las expuestas en campo; en muestras extraídas de roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal en Pajarito- Boyacá.
- Cuantificar el efecto de los ciclos de humedecimiento/secado, enfriamiento/calentamiento y simultáneamente los factores, sobre la resistencia mecánica en las muestras de la roca lodosa de la formación Lutita de Macanal.
- Identificar la incidencia del cambio de humedad y temperatura, en la respuesta mecánica de las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal

3. GENERALIDADES DEL PROYECTO

El presente capítulo contiene la descripción del sitio de estudio donde aflora la roca lodosa, iniciando con la localización y georreferenciación espacial, seguida por el análisis geológico regional y local, finalmente se hizo el análisis de hidrológico necesario para entender los cambios de humedad y temperatura en la zona.

En posteriores numerales, se dará a conocer toda la información de propiedades físicas, mineralógicas y químicas de la roca lodosa. Adicionalmente se continuará con el diseño metodológico en laboratorio para determinar el efecto de los cambios de humedad y temperatura sobre el geomateriales.

3.1 LOCALIZACIÓN GENERAL

El sitio de estudio se escogió debido a su importancia en el análisis regional que genera la estabilidad de obras civiles que surgen sobre la cordillera oriental de los Andes Colombianos. Eventualmente, nuevos proyectos de infraestructura como vías e hidroenergéticos para los Llanos Orientales y la región Andina, fueron construidos o son planeados construir sobre la roca lodosas que se encuentran sobre este importante área, el lugar de análisis está ubicado en las coordenadas relacionadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Localización general del punto de estudio, coordenadas geográficas y planas (origen centro)

Coordenadas Geográficas		Coordenadas Planas		Altitud msnm
Latitud	Longitud	Norte	Este	
5°26'37.16"N	72°42'33.61"O	1093885.738	1151636.107	2224

Fuente: Autor

El área de estudio se encuentra en el municipio de Pajarito, departamento de Boyacá cerca al límite entre el mencionado y municipio de Aquitania. En este sector se encuentra el eje vial transversal del Cusiana- Ruta 6211, el sitio de análisis es fácilmente identificable al encontrarse en el costado derecho de la vía sobre el PR63+820, de la Ruta mencionada, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Localización general del sitio de estudio



Fuente: Google Earth

2.2 LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL.

Ulloa y Rodríguez (1979)³, presentaron la primera caracterización geológica del área de estudio, determinando que afloran rocas sedimentarias con edades del cretácico inferior al presente, las rocas de edades Terciarias, Paleógenas y Neógenas, no se presentan en la zona debido a que el sitio de estudio se ubica sobre el flanco oriental de una estructura tipo Anticlinal Regional (Anticlinal del Río Suncé), estas unidades están situadas en la cresta de dicha estructura ya erosionada.

Las unidades que afloran en esta área hacen parte de la Región de los Farallones, siendo estas las más antiguas; de base a techo se tienen La Formación Lutitas de Macanal (Kilm), la Formación Areniscas de las Juntas (Kiaj), La Formación Fomeque (Kif) y Depósitos Cuaternarios Aluviales y Coluviales (Qal, Qc), en trabajos geológicos anteriores las Formaciones Lutitas de Macanal (Kilm) y Areniscas de las Juntas (Kiaj) se consideraban parte de un solo grupo geológico (Grupo Cáqueza), debido a la escala del proyecto y su diferenciación notoria en el cañón del Río Cusiana, no se hará mención a este Grupo Geológico dentro del proyecto.

³ INGEOMINAS. Memoria Explicativa. Geológica del cuadrángulo K12 de Guateque. Informe 1701, 18p. Boletín Geológico.(1979)

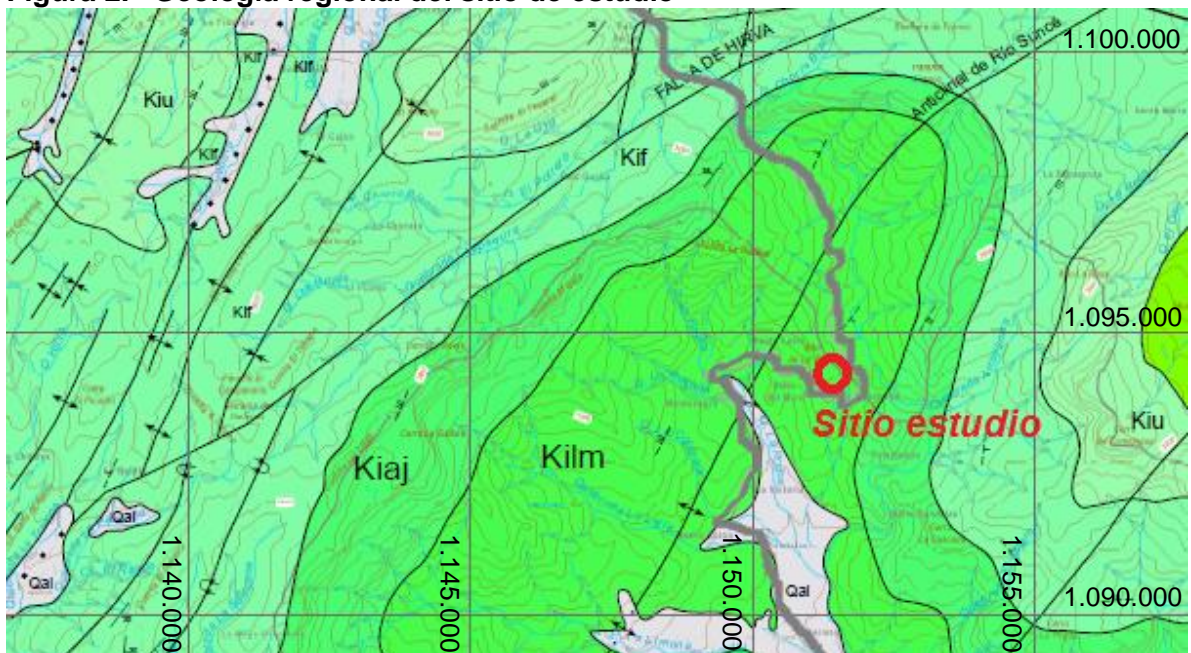
2.2.1 Formación Lutitas de Macanal (Kilm)

La roca lodosa objeto de análisis se ubica sobre la formación Lutitas de Macanal (Kilm); dicha formación aflora en sentido Nororiente a suroccidente de la geografía regional, está constituida por un conjunto de lutitas negras (lodolitas y arcillolitas fisiles) que se depositaron en un ambiente marino, de aguas someras en una cuenca cerrada (Ulloa y Rodríguez, 1976).

Hace parte del Anticlinal del río Suncé y el Sinclinal El Desespero, la unidad presenta una geomorfología suavemente ondulada, que contrasta con la topografía abrupta de la unidad suprayacente, Formación Areniscas de la Junta (Kiaj). La parte más antigua de la unidad se observa en el núcleo del Anticlinal del Río Suncé, en donde está constituida de arcillolitas y lodolitas fisiles con intercalaciones de limolitas cuarzosas, que varían de color gris oscuro a negro. La parte superior de la unidad se observó por la carretera Sogamoso – Pajarito, constituida de arcillolitas y lodolitas fisiles de color gris oscuro a negro, con algunas intercalaciones de areniscas de cuarzo, de grano medio a fino, en paquetes de 50 m de espesor.

El espesor aflorante con base en cortes geológicos, es de unos 1.100 m, lo cual indicaría que solamente aflora la parte media o superior de la unidad, si se compara con el espesor medido en el área del Río Batá que es de 2.935 m, la geología regional puede ser detallada en la figura 2.

Figura 2. Geología regional del sitio de estudio



Fuente: plancha 192- servicio geológico colombiano.

2.2.2 Falla regional

La falla regionales de mayor impacto en la zona de estudio es la falla de Hirva, esta es de tipo normal con desplazamiento hacia la izquierda, con dirección N45°E y buza hacia el NW, produce un importante desplazamiento de las formaciones Fomeque (Klf) Une (Klu) y Chipaque (Ksc), genera importantes levantamientos topográficos y cambio de la orientación de la parte norte del Anticlinal del río Suncé

2.3 LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA LOCAL

La unidad Lutitas de Macanal (Kilm) es predominantemente arcillosa-lodosa con intercalaciones de dos conjuntos arenosos; en la localidad tipo, reposa discordante sobre el Grupo Quetame e infrayace concordante a las Areniscas de Las Juntas, fue subdividida de base a techo, en los conjuntos A, B, C y D⁴, se hace una descripción de los cuatro miembros haciendo la salvedad de que en el área de estudio aflora el miembro medio-superior C que se describen a detalle y de los cuales se levantó columna estratigráfica sobre la carretera Sogamoso – Pajarito.

2.3.1 Lutitas de Macanal Conjunto A (Kilm A)

Está formado en la base, por una brecha de 50 cm de espesor que pasa gradualmente a Lutitas negras compactas, el resto del conjunto corresponde a Lutitas negras compactas, micáceas, ligeramente calcáreas, con láminas de yeso y niveles piritosos en forma de fajas irregulares o lenticulares alrededor de los fósiles; frecuentes niveles fosilíferos de amonitas, lamelibranquios y gasterópodos; tiene un espesor de 760 m. La base de este conjunto se encuentra a unos 250 m al norte de la confluencia de la Quebrada La Esmeralda en el Río Bata, reposando discordante sobre el Grupo Quetame. En sitios cercanos a la Quebrada La Esmeralda y alrededores, el Conjunto A se observa en contacto fallado con los Grupos Quetame y Farallones.

2.3.2 Lutitas de Macanal Conjunto B (Kilm B)

Constituido en su base por areniscas cuarzosas, de grano fino, color gris claro, con estratificación gruesa a maciza, a las cuales le suprayacen niveles de Lutitas gris oscuras, micáceas, fosilíferas y en la parte superior, Lutitas arenosas, piritosas de color gris oscuro; el espesor del conjunto es de 140 m.

2.3.3 Lutitas de Macanal Conjunto C (Kilm C)

De techo a base se observan lutitas negras fisibles lodolitas y arcillolitas pardas claras, intercaladas con bancos de areniscas y limolitas ferruginosas con bioturbación que suprayacen lutitas negras compactas micáceas con delgadas capas de arenisca de grano fino ferruginosas fisibles y altamente fracturadas, esporádicas apariciones de caolín y vetas continuas de cuarzo. Ver Figura 3.

⁴ EBSA. Proyecto hidroeléctrico de Rancherías. Caracterización geológica. Colombia. P 32.

Figura 3. Intercalación de las Lutitas de Macanal C(Kilm C) PR 63+850 Ruta 6211.



Fuente: Autor.

2.3.4 Lutitas de Macanal Conjunto D (Kilm D)

En este miembro se distinguen tres segmentos descritos, a continuación.

2.3.4.1 Miembro inferior (Kilm D1). Constituido por Lutitas negras micáceas con intercalaciones delgadas de areniscas cuarzosas de espesores entre 0,5 m y 1,70 m, de grano fino, micáceas, bandeadas, fosilíferas de cemento arcilloso y esporádicamente se aprecia bioturbación; las lutitas se presentan altamente fracturadas y con impregnaciones de óxidos de hierro acompañados de cristales de cuarzo.

2.3.4.2 Miembro intermedio (Kilm D2). Formado por Lutitas negras carbonosas, compactas micáceas, ferruginosas con niveles fosilíferos y de nódulos silíceos de gran resistencia; intercaladas con láminas de arcillolitas pardas muy compactas y limolitas grises claras con bioturbación

2.3.4.2 Miembro Superior (Kilm D3). Corresponde a Lutitas negras con intercalaciones de capas delgadas de areniscas; espesor del conjunto D tiene 680 m. Este conjunto se encuentra suprayacido por las arenitas cuarzosas de grano fino ferruginosas de color gris oscuro y delgadas capas de cuarzo, macizas de cemento silíceo; las Lutitas presentan láminas de micas tipo moscovita, este Miembro se encuentra en contacto fallado concordante con el Miembro A de la Formación Arenisca de las Juntas.

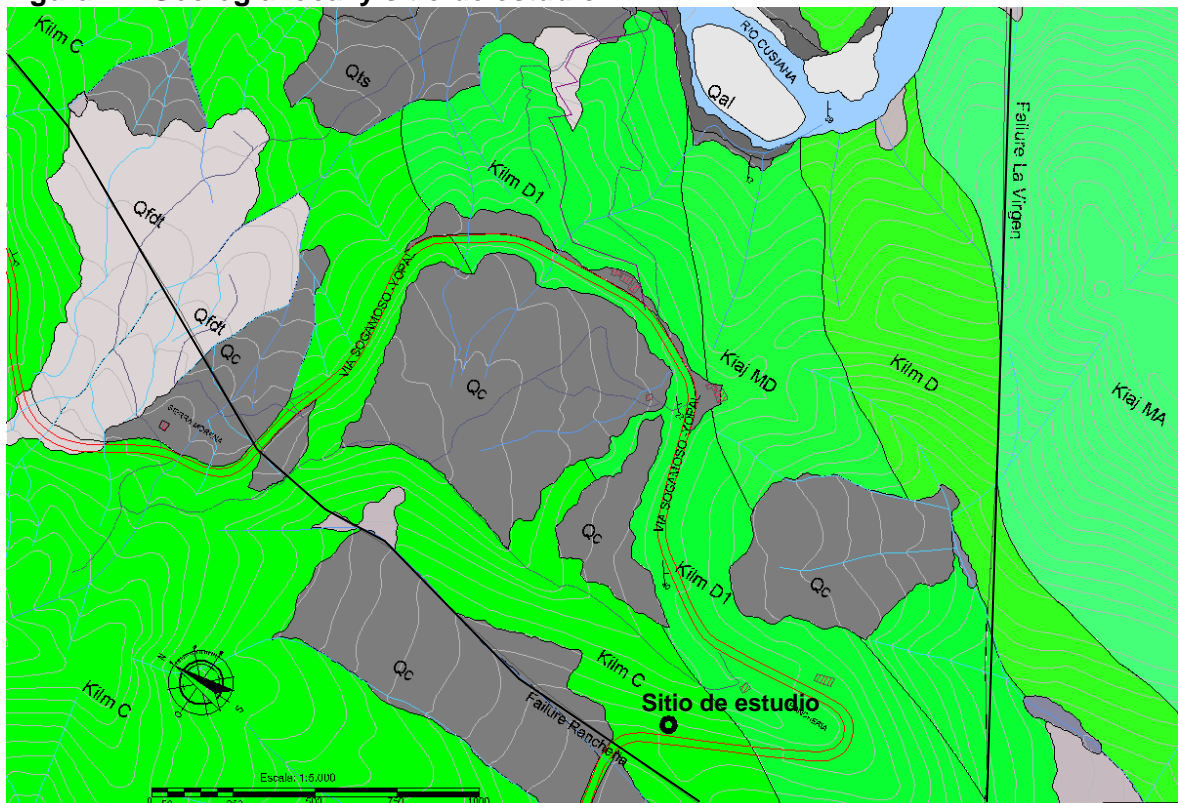
2.3.5 Fallas locales

Por la ubicación fisiográfica de la zona que comprende el sitio de estudio, esta se ha visto sometida a una intensa actividad tectónica como resultado de la orogenia andina, el continuo sometimiento a esfuerzos compresionales ha generado fallamiento y plegamiento que se ve reflejado en las rocas que comprenden la zona; las fallas encontradas en el área del proyecto son de carácter normal y de ubicación satelital.

2.3.5.1 Falla Ranchería. Esta falla de carácter normal atraviesa la zona del proyecto Hidroeléctrico Ranchería en sentido N-S con una tendencia hacia el SW, corta los cuatro miembros de la formación Lutitas de Macanal (Kilm) y desplaza levemente las unidades en sentido NE, el tazo de la falla afecta las rocas adyacentes generando inestabilidad y problemas en las obras, como carreteras y gaviones.

2.3.5.2 Falla La Virgen. Esta falla pone en contacto los miembros de la Formación Lutitas de Macanal Kilm D3 y Kiaj MA y produce una repetición de la primera sección del Miembro inferior de la formación Arenisca de las Juntas (Kiaj MA), la falla presenta un componente de rumbo y genera procesos de movimientos en masa en su zona de influencia. Esta falla es satelital y debido a la cobertura vegetal de la zona no fue posible observar de manera directa su trazado, aunque si es notoria la afectación.

Figura 4. Geología local y sitio de estudio



Fuente: Proyecto hidroeléctrico de Rancherías- EBSA.

2.4 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

El sitio de estudio tiene una estructura litificada y laminada, en esta se observa la fracturación de la megaescala debido a la cercanía de la falla Rancherías, a continuación, se describe la caracterización en campo del macizo rocoso.

2.4.1 Datos de Campo.

Para evaluar la resistencia del material se empleó el Índice de dureza del martillo de rebote Schmitd, el cual se emplea en la práctica común de la mecánica de rocas y es sugerido como método de ensayo, y aunque tiene limitaciones de uso tanto en rocas muy blandas como en rocas muy duras, se considera un buen indicativo de la condición del material respecto de algún estado de referencia, estos valores pueden ser vistos en la Tabla 2.

Tabla 2. Lectura de matillo de Schmitd

Lectura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
punto 1	15	19	16	16	14	13	19	17	17	19	17
punto 2	22	15	19	14	13	19	17	17	19	16	17
punto 3	16	16	14	13	19	17	19	19	16	15	16

Fuente: Autor.

Los valores del Numero de Rebote (RN) fue de 17, equivale a una resistencia a la compresión axial (σ_c) de aproximadamente 11 MPa.

2.4.2 Caracterización del macizo rocoso

A continuación se describe la ejecución de la caracterización del macizo rocoso mediante GSI y RMR.

2.4.2.1 Clasificación GSI. Hoek (2006)⁵, señaló que para el caso de rocas débiles, una de las clasificaciones geomecánica a usar es la de GSI. El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades mecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo. Las observaciones se basan en apariencia del macizo a nivel de estructura y a nivel de condición de la superficie. En el nivel de estructura se tiene en cuenta la alteración que sufren las rocas, la unión que existe entre ellas, que viene dada por las formas y aristas que se presentan, así como de su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si está alterada, si ha sufrido erosión, o qué tipo de textura presenta, y el tipo de recubrimiento existente.

⁵ HOEK Evert. Practical rock engineering. Rock mass classification. Canada. 2006. Tomo 1. Pp 1-11.

La clasificación de Marinos y Hoek (2002)⁶, se basa principalmente en un ábaco que muestra los valores del GSI variando desde 1 hasta 100. Los valores cercanos al 1 corresponden a las situaciones del macizo rocoso de menor calidad, es decir con la superficie muy erosionada, con arcilla blanda en las juntas, y con una estructura poco resistente debido a las formas redondas y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión (criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas).

Los datos de campo de RN del martillo de Schmitd, permitieron estimar la resistencia a la compresión de la roca intacta, en 11,0 MPa, este valor permite identificar que es una roca débil, la anterior clasificación se corrobora con la dificultad de raspar la superficie de la roca con una navaja y la no detestación inmediata de desprendimientos de fragmentos cuando se da un golpe contundente con el martillo geológico.

La clasificación de la textura de la roca inicia por reconocer que el macizo rocoso siendo de origen sedimentario y de textura muy fina, identificable como un shale para la literatura de interés. Dadas las características principales del macizo rocoso (ver Figura 5 y Figura 6). El valor de GSI corresponde a 35, lo que da un rango de la estructura/condición de la estructura como muy fracturada.

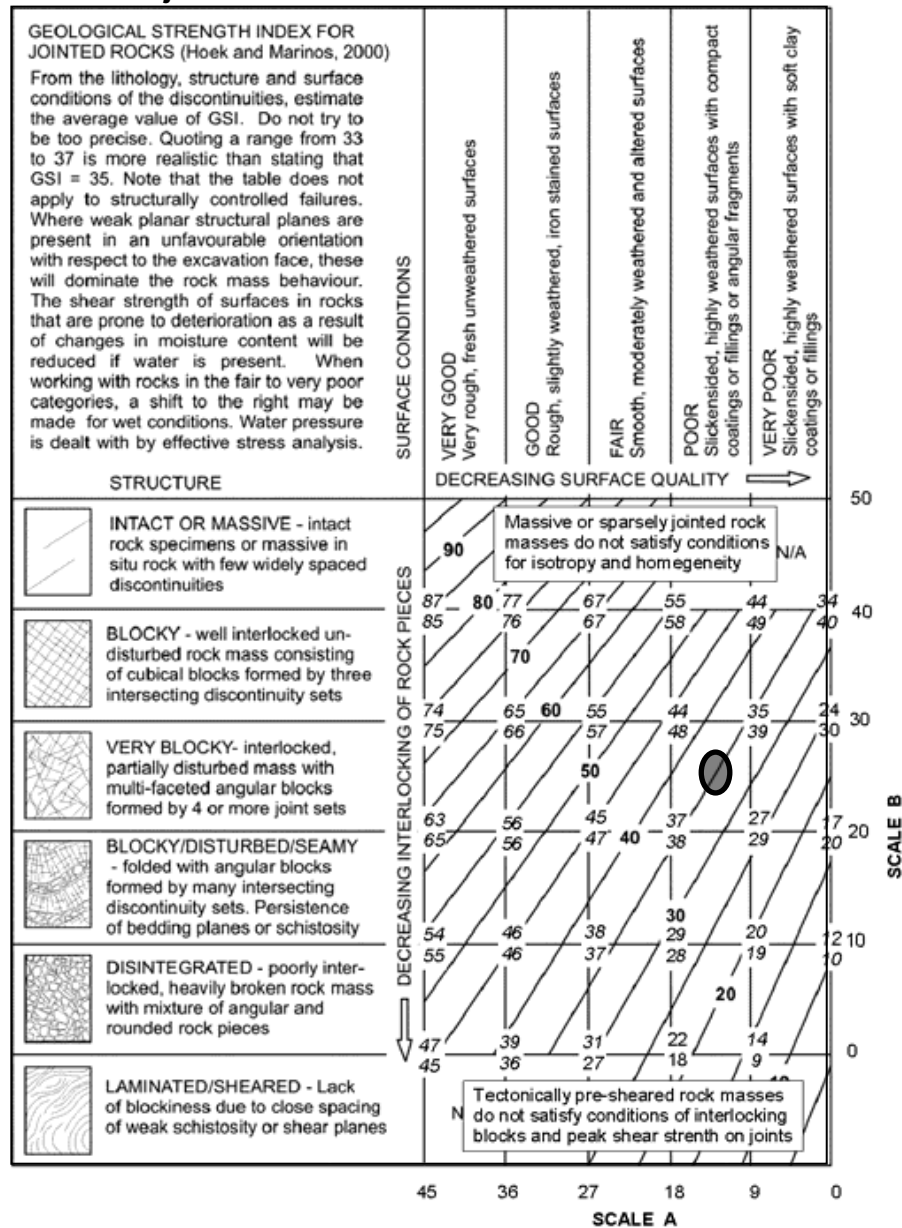
Figura 5. Caracterización geológica de la roca lodosa en el sitio de estudio. Formación Kilm – miembro C



Fuente: Autor

⁶ MARINOS Paul, HOEK Evert. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Canada.2002

Figura 6. Carta para evaluación el índice de resistencia geológica (GSI) del macizo rocoso fracturado objeto de estudio



Fuente: Marinos and Hoek (2002).

2.4.2.2 Clasificación RQD. La clasificación de Deere o del RQD (Rock Quality Designation) se fundamenta en la cuantificación del grado de fractura de la roca.

Permite la obtención de un índice de comportamiento, que es un valor cuantitativo que representa la calidad del macizo rocoso, teniendo en cuenta las características del testigo recuperado en una perforación.

Para este valor de calidad de la roca, se tuvo que realizar conteo de diaclasas en forma vertical y otro en forma horizontal, para ser promediados y tener un valor aproximado. El número de familias de discontinuidades tomadas en esta investigación fueron de 3, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores estructurales del macizo rocoso en campo

Datos estructurales	Dirección (°)	Buzamiento (°)
Estratificación	313	15
Discontinuidad 1	74	87
Discontinuidad 2	115	39
Discontinuidad 3	132	88

Fuente: Autor.

Cada una de las familias de diaclasas tuvieron máximo 0,15 m de espaciamiento hasta encontrar la siguiente línea de fractura, siendo una red muy fracturada, hecho que fue corroborado durante la extracción de núcleos cilíndricos de bloques de roca del sitio de estudio, en los que la máxima longitud de testigo lograda fue de 0,09 m. Por lo anterior que el valor RQD fue de 0. El anterior valor de RQD corresponde al estado y naturaleza del macizo rocoso superficial.

2.4.2.2 Clasificación RMR Evert Hoek (2006)⁷, describió la metodología desarrollada por Bienawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989. Constituyendo un sistema de clasificaciones de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geotécnicos a los cuales se les añadió una valoración por cada uno establecida por la clasificación geomecánica RMR para el posterior análisis estadístico y valoración de los macizos rocosos (), las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal en el sitio de estudio, está caracterizada de la siguiente forma:

- Resistencia a la Compresión Uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos de RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Estado de las discontinuidades. Este parámetro contempla; rugosidad, abertura, relleno, alteración y continuidad de la misma, cada una tendrá una evaluación individual.
- Condición de agua subterránea.

Los resultados de cada uno de los parámetros considerados para la clasificación del macizo rocoso (RMR), se dan a conocer en la Tabla 4

⁷ HOEK Evert. Op cit. 2006. p 9

Tabla 4. Evaluación del macizo rocoso por RMR

Parámetro de Clasificación	Valor	Valuación
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	11	2
RQD %	0	3
Separación de las Discontinuidades	muy juntas (2-6 cm)	5
<i>Rugosidad- JRC.</i>	ondulada	3
	lisa	
<i>Abertura.</i>	abierta	1
Estado de las discontinuidades	(0.25-2.5 mm)	
<i>Relleno.</i>	Arcilla	1
<i>Alteración.</i>	Muy alterada	1
<i>Continuidad.</i>	Alta (10-20m)	1
Agua subterránea	Húmedo	9
Valoración RMR		26

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta la condición meta-estable del geomaterial, sin incluir obras en la finalidad de la caracterización del macizo rocoso, el rango para la roca lodosa del sitio de estudio es tipo IV, RMR entre 21-40, correspondiente a una clasificación de roca mala.

2.5 CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA

El clima del sitio de estudio es uno de los principales factores a considerar. Las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal (Kilm) están acondicionadas a variables medioambientales como lo son los cambios en la humedad y temperatura, las cuales son constantes y están gobernadas bajo temporadas humedad y secas de la región tropical.

Según los reportes consultados del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)⁸, a continuación, se da a conocer las condiciones hidrológicas de la zona de estudio, enfatizando en la humedad y temperatura, como el principal componente a tener en cuenta para el posterior desarrollo de la investigación.

⁸ INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Consultado en octubre de 2018. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>.

Teniendo en cuenta localización del sitio de estudio y la altitud de la misma, se puede dar una mayor aproximación a las condiciones climáticas imperantes conforme a las siguientes estaciones meteorológicas, Tabla 5.

Tabla 5. Estaciones meteorológicas aledañas al sitio de estudio

Estación	Código	Tipo	Coordenadas		
			Latitud	Altitud	Altura
Corinto	3519505	CO	0525	7243	1550
Pajarito	3519005	PM	0517	7242	842
Toquilla	3519002	PM	0531	7247	2950

Fuente: IDEAM.

2.5.1 Temperatura

El sitio de estudio se encuentra en una altura de 2224 msnm, el piso térmico a la que esta cota corresponde está en el límite clima frío del piso Andino y climas templados del piso Subandino, la temperatura media en el ambiente registrada esta entre los 9 y 22 °C. A continuación, se presenta la fluctuación anual de temperatura en la estación con mayor proximidad al sitio de estudio, estación Corinto, Tabla 6.

Tabla 6. Variación de la temperatura en la estación Corinto

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	V/Anual
Medios	18,8	19,0	18,9	19,0	18,9	18,6	18,0	18,1	18,4	18,5	18,6	18,8	19,6
Máximos	20,4	21,1	20,1	19,9	20,5	20,4	20,3	19,4	19,4	19,7	19,6	20,1	21,1
Mínimos	16,6	16,6	16,9	17,0	17,5	17,2	16,6	16,5	16,1	16,3	16,3	16,2	16,1

Fuente: IDEAM

Según los datos las fluctuaciones de la estación más cercana al sitio de estudio varía entre 16,1 y 21,1 °C, esta medida de temperatura es la registrada en el ambiente, brindo la información de que si existe la variación de la temperatura, realizando el mismo análisis con la estación Toquilla la variación de la temperatura esta entre los 6,0 Y 15,0 °C. El punto de estudio esta intermedio a la altura y posición de las dos estaciones mencionadas, lo que permite determinar el rango de temperatura ambiente en la que se encuentra la roca lodosa de la Formación Lutitas de Macanal (Kilm).

2.5.2 Humedad Relativa (HR)

Es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, importante para muchos ecosistemas, ya que puede afectar notablemente la transpiración de los órganos de plantas y animales. Además, la humedad presente en la atmósfera puede dar lugar a la formación de nubes y también a la lluvia.

La fluctuación de la humedad relativa (HR) refleja los períodos de invierno y verano ocurridos durante el año, es así que en los meses de menor precipitación se presentan humedades bajas y viceversa, ver Tabla 7.

Tabla 7. Valores de HR de la estación Corinto

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	V/Anual
Medios	71	71	73	76	78	78	78	78	77	77	79	75	76
Máximos	80	83	82	82	82	83	82	84	83	84	87	82	87
Mínimos	55	54	63	67	73	71	74	71	72	64	65	58	54

Fuente: IDEAM.

Los datos anteriores establecen que hay un periodo semi-seco y otro húmedo, el valor más alto de HR es de 87 % correspondiente al mes de noviembre y semi-seco es de 54 % en el mes de febrero.

2.5.3 Precipitaciones.

La cantidad y la distribución de las lluvias en un lugar dado depende de dos factores básicos: la circulación de los vientos y el relieve (forma y orientación de las montañas). La acción de los vientos de la ZCIT produce tiempo lluvioso o ciclónico y su ausencia tiempo menos húmedo o anticiclónico.

Para el sitio del investigación y caracterización el régimen pluviométrico es monomodal es decir, se presenta un único período de lluvias en el año. En la Tabla 9 se observa el comportamiento pluviométrico para las estaciones relacionadas en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de precipitación (mm) en la región

ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	V/Anual
Pajarito	26	61	146	347	470	538	637	513	455	374	197	76	3841
Corinto	49	69	139	266	367	388	407	312	356	315	214	61	2944
Toquilla	11	25	56	101	157	181	200	165	135	95	72	24	1225

Fuente: IDEAM.

Puede observarse que la distribución de lluvias en las estaciones es muy similar; en los meses de mayo a agosto se presentan las máximas precipitaciones con valores registrados de 637,7 mm y 200,1 mm para Pajarito y Toquilla respectivamente, estaciones que registran la más alta y la más baja pluviosidad anual. Para estas mismas estaciones los períodos de menor pluviosidad

noviembre a Marzo con 25,8 mm y 11,4 mm; los demás meses se consideran como transición entre los períodos secos y húmedos.

El régimen pluviométrico aumenta con el gradiente altitudinal Este a Oeste, es decir, mientras que en el límite de Pajarito y Aquitania se registran precipitaciones de 2000 mm/año, en el límite de Pajarito con Aguazul, Casanare se registraron cerca de 4000 mm/año.

El análisis hidrológico de la zona de estudio permite determinar las fluctuaciones de la temperatura, la humedad relativa y la precipitación, logrando identificar el ambiente natural en el que se ven sometidas las rocas lodosas. Dichas variaciones son estudiadas y analizadas en detalle para encontrar la verdadera incidencia de los agentes de meteorización física sobre los geomateriales, en especialmente la temperatura, teniendo en cuenta que el efecto del cambio térmico es mayor al considerar la insolación producto los rayos del sol.

3. MARCO REREFENCIAL

El desarrollo de la investigación continúa con la demarcación de las bases teóricas que se utilizan para ejecutar el diseño experimental y el análisis de resultados que se muestran y discuten en los siguientes capítulos. Seguido del Marco Teórico se describen los principales estudios e investigaciones que evalúan el efecto de los cambios de humedad y temperatura.

3.1 MARCO TEÓRICO

Los conceptos necesarios inician con la demarcación del origen y características esenciales de las rocas lodosas, la influencia de la succión en geomateriales y el uso de la técnica que equilibrio de vapor VET, para lograr cambios de humedad.

3.1.1 Características de las Rocas Lodosas

Alarcón (2001)⁹, definió la roca como cualquier material consolidado, que se haya formado por procesos inherentes a la evolución del globo terráqueo y que puede estar compuesta de uno o más minerales, teniendo características químicas y mineralógicas definidas.

3.1.1.1 Composición de la roca lodosa

Krumbein y Sloss (1963)¹⁰, especificaron que las rocas lodosas son agregaciones compuestas de partículas comprendidas entre tamaños limo, 2,0 μm a 62,5 μm y arcilla, menor que 2.0 μm , de acuerdo con la escala de clasificación. Potter P et al (2003)¹¹, Los lodos son denominados como una mezcla de agua con arcilla y/o limo junto con materiales de otras dimensiones. Montero J. (2010)¹², señaló que quienes emplean el término para referirse a depósitos de grano fino, de cualquier composición, que contienen 50 % o más en peso de minerales arcillosos, carbonato, ceniza volcánica, arena fina y aun diatomeas. Estos se comportan plásticamente cuando se humedecen; no obstante que en ocasiones se pueden tener porcentajes mayores que 50 % de limos presentes; la terminología asociada a las rocas lodosas, que en este contexto incluye diversidad de litologías

⁹ ALARCON Adolfo. Introducción a la geología con ejemplos de Colombia, INGEOMINAS, 2001, pp 41.

¹⁰ KRUMBEIN W, SLOSS L. Stratigraphy and sedimentatio., 2nd edition (Freeman, San Francisco). 1963

¹¹ POTTER P et al. Mud and mudstones, introduction and overview. Springer. ISBN 3-540-22157-3, New York (USA) 2003.

¹² MONTERO J, TORRES M, PALOMINO C, CORTÉS R. Rocas lodosas de la cordillera oriental de Colombia. XIII Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia. Manizales (Col), 21-25 de septiembre de 2010. ISBN 978-958-98770-2-9, pp. A3-1 - A3-63.

sedimentarias como las lutitas, lodolitas, limolitas, arcillolitas y los denominados shales.

3.1.1.2 Ambiente de sedimentación para la roca lodosa

Torres (2006)¹³, describió que en rocas lodosas, el ambiente sedimentario propicio requiere de condiciones favorables para la precipitación de lodos y limos, esto es aguas tranquilas con mínima energía. Dichas condiciones se tienen preferiblemente en ambientes deltaicos y lagunares, siempre y cuando estén resguardados de las olas; también mar adentro en ambientes de baja agitación.

Torres (2011)¹⁴, señaló que en cuanto a mecanismos de transporte de sólidos constitutivos de rocas lodosas se sabe que la fracción arcillosa es transportada por suspensión por corrientes fluviales, deltas, corrientes de marea, corrientes de turbidez y aún las corrientes oceánicas profundas hacia las cuencas sedimentarias (lagos u océanos), en tanto que las partículas tamaño limo son arrastradas indistintamente en suspensión o como carga de fondo.

De igual manera el anterior autor refirió que los sedimentos se depositan en forma suelta generando láminas de material, donde cada lámina se constituye en una interfase entre el material previamente acumulado y el medio de sedimentación, representando así una condición de borde que separa dos regiones físico – químicas: la lámina de material suelto saturada de agua y la columna de agua. En la medida que la lámina de lodo va quedando sepultada por el material que se acumula en la parte superior, los poros se van cerrando y la posibilidad de flujo se restringe, quedando las láminas inferiores sometidas a diversas condiciones de presión.

3.1.1.3 Clasificación de la roca lodosa.

En la Tabla 10 se incluye la terminología de rocas lodosas propuesta por Lundergard y Samuels (1980)¹⁵ que se considera como una clasificación de campo. Se basa en dos características muy simples que se pueden reconocer fácilmente en terreno con ayuda de una lupa: la proporción de limo contiene la roca, y si es o no laminada.

¹³ TORRES M. Síntesis del estado del conocimiento sobre el comportamiento esfuerzo–deformación y degradabilidad de rocas lodosas. VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas, Sociedad Colombiana de Geotecnia – ISRM. Cartagena (Col), ISBN 958-33-9677-X. 2006. pp. 477-491.

¹⁴ TORRES Mario. Op Cit. 2011. p I-18

¹⁵ LUNDEGARD P. y SAMUELS N. Field classification of fine-grained sedimentary rocks: J Sediment. Petrol. 50. 1980. pp 181-786

Tabla 9. Clasificación de rocas lodosas petrográficamente

Limo < 1/3	Limo < 1/3 - 2/3	Limo > 2/3	Tamaño partículas
Arcillolita	Lodolita	Limolita	No laminada
Shale arcilloso	Shale lodoso	Limolita laminada	Laminada
Suave cuando se mastica	Arenoso cuando se mastica	limo abundante y visible con una lupa	Criterio de campo

Fuente: Mario Camilo Torres (2011).

Las rocas lodosas pueden tener la denominación de shales de cementación o compactación. Mead (1932)¹⁶, describió los shales de cementación como aquellos que son más deformables que otras rocas pero con la resistencia del concreto y además con durabilidad aceptable, es decir, resistentes a la acción del clima. En su proceso de consolidación diagenética estos shales se densifican fuertemente, pero además están cementados con sílice, carbonato de calcio u otro tipo de aglutinante perdurable, que les permite mantener su alto grado de litificación cuando se descargan en la denudación. Por otra parte se denominan shales de compactación a los shales litificados solo como consecuencia de las presiones diagenéticas, es decir que poseen una cementación deficiente o inexistente y se deterioran muy rápidamente una vez expuestos a los agentes atmosféricos. Este segundo tipo de roca loda es una condición extrema de degradación que puede poseer muy baja resistencia y experimentar alta deformabilidad, en forma semejante a los suelos corrientes. Es común identificar a los shales de cementación como del tipo roca y a los shales de compactación como del tipo suelo.

3.1.1.4 Meteorización de rocas lodosas

La meteorización corresponde a la desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos en superficie, el término incluye todas aquellas alteraciones de carácter físico o químico que modifican las características y propiedades de los materiales. González (2002)¹⁷, explicó los procesos de meteorización, estos están controlados por sus condiciones climáticas y sus variables de temperatura, humedad, precipitación, régimen de vientos, etc, que determinan el tipo y la humedad de las transformaciones físicas y químicas que afectan a los materiales rocosos en superficie. Las acciones de origen físico producen la fracturación mecánica de la roca, las más importantes controladas por el clima, en especial por la temperatura y la humedad son:

¹⁶ MEAD, W. Engineering geology of dam sites transactions. 2nd International Congress of Large Dams. International Committee on Large Dams. Paris. 1936. pp. 171-192.

¹⁷ GONZÁLEZ Luis. Ingeniería geológica. Meteorización en rocas. Madrid. 2002. pp 135.

- Insolación: en climas áridos las causadas diferencias térmicas en periodos cortos de tiempo producen tensiones en la roca por dilatación y contracciones sucesivas, que dan lugar a la fracturación de las mismas.
- Hidratación: determinados tipos de materiales (arcillas, sulfatos) aumentan su volumen al sufrir hidratación, produciendo deformaciones importantes que pueden llevar a la fracturación de la roca.

En cuanto a las rocas de grano fino la acción y los efectos de la meteorización serán distintos dependiendo del tipo de roca están directamente relacionados con su composición mineralógica y sus propiedades estructurales; por ello, las rocas arcillosas son más afectadas por los procesos de meteorización física y las que más sufren su influencia en las propiedades físicas y mecánicas.

Deere y Patton (1976)¹⁸, realizaron el estudio de estabilidad de taludes en suelos residuales, señalando que en los taludes fallados en suelos residuales y rocas meteorizadas son comunes en climas húmedos templados y tropicales, en particular en periodos de intensas lluvias. El perfil de meteorización que se ha desarrollado en una roca durante un largo periodo altera los esfuerzos y la permeabilidad características que aumentan la posibilidad de falla de un talud. La meteorización se extiende a una profundidad de 2 m a 13 m bajo shales.

A su vez Bjerrum (1967)¹⁹, estudió las fallas progresivas vistas en los problemas de estabilidad de taludes en arcillas plásticas sobreconsolidadas y lutitas arcillosas. Describe la meteorización mecánica de las lutitas arcillosas en 4 diferentes zonas de desintegración, entre las que se destaca; 1) Superficie completamente desintegrada que es afectada por congelamiento, cambios de temperatura, secado y humedecimiento, y por descomposición química. El agua contenida y los esfuerzos en esta zona son debido a las condiciones climáticas.

3.1.2 Aspectos teóricos de los cambios de humedad.

Aquí se consideran aspectos fundamentales en el tratamiento de la técnica y modelo de comportamiento posteriormente aplicados, que deben ser precisado en orden a evaluar críticamente su limitación y potencialidad, sobretudo en rocas arcillosas de carácter laminado, con baja permeabilidad y cuya aplicabilidad no ha sido suficientemente reconocida por la comunidad investigadora en mecánica de rocas

¹⁸ DEERE D, PATTON F. D. Slope stability in residual soil. En: Fourth Panamerican Conference. 1976. pp. 88-118.

¹⁹ BJERRUM L. Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 93 (SM5): 1967. pp. 3-49.

3.1.2.1 Succión controlada

Cho (2001)²⁰, mencionó que la succión es una condición de los materiales que cuando está presente incrementa su resistencia, debe ser evaluada en orden a comprender el comportamiento mecánico de los mismos, especialmente tratándose de materiales finogranulares en los que además se presentan fenómenos relacionados como expansividad – contractancia, intercambio catiónico y en general intensa actividad electroquímica debido a la interacción en la superficie de partículas arcillosas y el agua de poros.

Investigadores en suelos, particularmente aquellos dedicados a las ciencias agrícolas, han venido investigando la capacidad de retención de agua en estos materiales, con el propósito de evaluar efectos que esta propiedad tiene en el crecimiento y posterior desarrollo de las plantas; sin embargo, en las últimas dos décadas se ha intensificado la investigación en suelos en condición parcialmente saturada, lo que ha permitido implementar diversas técnicas de imposición y medición de succión.

Romero (2001)²¹, indicó que algunas de estas técnicas trabajan transfiriendo vapor proveniente de una solución salina o ácida al suelo, de manera tal que luego de transcurrido cierto tiempo se logre un equilibrio entre el potencial de la solución y el adquirido por el suelo o material sometido a ella; una de esas técnicas es la del equilibrio de vapor que trabaja en un intervalo de succiones comprendido entre 3 MPa y 400 MPa aproximadamente.

Melo (2010)²², refirió que la succión matricial o energía potencia matricial, está asociada a las fuerzas capilares existentes en el suelo. El fenómeno de ascensión capilar tiene lugar como consecuencia de la atracción entre las moléculas de agua y las partículas de suelo, así como por la tensión superficial del agua. Este fenómeno provoca que el agua ascienda a través de los poros presentes en el suelo, lo que justifica la presencia de agua por encima del nivel freático en suelos no saturados. Esta ascensión capilar del agua en el suelo dependerá de las características mineralógicas del suelo y del tamaño característico de los poros del suelo: suelos con poros pequeños presentarán una mayor ascensión capilar. Por tanto, en la zona del suelo que comprende la ascensión capilar, se presentan valores de presión de agua negativos respecto a la presión de aire. La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros se define como la succión matricial.

²⁰ CHO G, SANTAMARINA J. Unsaturated particulate materials—particle-level studies. En Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 1. 2001 pp. 84-96.

²¹ ROMERO E. Controlled-suction techniques. 4º Simpósio Brasileiro de Solos No Saturados. W.Y.Y. Gehling & F. Schnaid (eds.). Porto Alegre, Brasil. 2001: pp. 535-542.

²² MELO Xiomara. Tesis de maestría en geotecnia. Influencia de la succión en la resistencia al corte de suelos reconstituidos derivados de rocas lodosas. Bogotá. 2010. pp 54

Ridley (1993)²³, argumentó la relación entre succión y humedad relativa generada por un fluido tipo agua fue propuesta inicialmente por Kelvin, mediante la ley psicrométrica, que se fundamenta en la presión que ejercen los gases ($R = 8,3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), la temperatura absoluta ($T = 293^\circ \text{ K}$ a 20° C), la masa molar del agua ($M_w = 18.018 \text{ g mol}^{-1}$) y su densidad ($G_w = 1.0 \text{ Mg/m}^3$). La humedad relativa (HR) se define como la presión del vapor de agua sobre la presión saturada del vapor de agua, Ecuación 1.

$$(u_a - u_w) = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} * \ln \left(\frac{HR\%}{100} \right) \quad \text{EC. 1.}$$

En la Ecuación 1 al diferencial entre la presión del aire (u_a) y la presión del agua (u_w) se le denomina succión matricial, definida como la energía necesaria para remover una molécula de agua de la matriz del suelo, sin que ésta cambie de estado. De otra parte la succión total es la suma de las succiones matricial y osmótica, esta última debida a la presencia de sales disueltas en el agua de poros.

De acuerdo con investigaciones previas de Fredlund (1995)²⁴ y Ridley (1995)²⁵, la succión que agrega la presión osmótica es relativamente despreciable cuando la succión total es alta, esto es cuando está por encima de los 3,0 MPa, debido a que predomina la succión matricial la cual no es afectada por la osmótica y en consecuencia estas dos succiones pueden considerarse como variables independientes.

Para Romero (2001)²⁶, dentro de las técnicas más empleadas para imposición y medición indirecta de succión están las que se fundamentan en transferencia de vapor, ya que además de cumplir los dos objetivos no requieren montajes experimentales complicados ni equipos sofisticados, como los que implican técnicas tradicionales de medición de succión, v.g. traslación de ejes o la técnica osmótica, que se fundamentan en transferir la fase líquida de un suelo a través de una membrana permeable o sales disueltas.

Torre (2011)²⁷, usó la técnica basada en transferencia de vapor que se fundamenta en la humedad relativa que generan mediante soluciones salinas (4 MPa a 400 MPa) o ácidas (20 MPa a 400 MPa) con las que trabaje y el tiempo requerido para equilibrio (± 3 semanas). Recopilaciones de los aspectos más sensibles de la succión como parámetro de resistencia en suelos, técnicas

²³ RIDLEY A. The measurement of soil moisture suction. PhD Thesis, University of London. 1993

²⁴ FREDLUND D, XING A, FREDLUND M, BARBOUR S. The relationship of unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. En: Canadian Geotechnical Journal, 32: 1995. pp. 440-448.

²⁵ RIDLEY A, BURLAND J. Measurement of suction in material which swell. En: Applied Mechanics Reviews, Vol. 48, No. 10. 1995. pp. 727-732.

²⁶ ROMERO Op Cit. 2001

²⁷ TORRES Mario. Op Cit. 2014. p III-18

procedimentales para su determinación y conceptos teóricos básicos se encuentra en sin número de documentos científicos, pero trabajos que se interesen por esta temática en rocas son relativamente pocos.

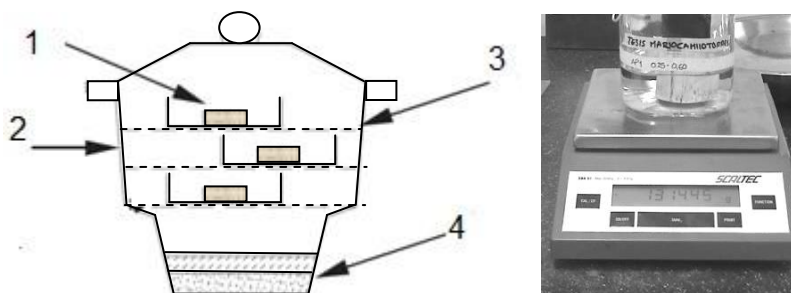
- Técnica del equilibrio de vapor (VET)

La técnica del equilibrio de vapor se implementa controlando la humedad relativa de un sistema cerrado con respecto al vapor. De esta forma según Melo (2010)²⁸, el potencial del agua del suelo es aplicado por medio de la migración de moléculas de agua a través de la fase de vapor desde un sistema de referencia de potencial conocido a los poros del suelo, hasta que se alcanza el equilibrio.

Para Tang y Cui (2005)²⁹, el uso de soluciones no saturadas tiene la ventaja de proporcionar rangos continuos de valores de succión, pero es difícil mantener constante la concentración durante el ensayo.

La Figura 7 muestra un ejemplo del desecador con un disco poroso sobre la solución que sostiene las muestras de suelo en el ambiente de vapor sobre las soluciones químicas. Usando diferentes soluciones químicas, en cuanto a tipo de sal empleada y concentración de la misma, se generan ambientes de vapor diferentes. En el desecador ocurre un intercambio de agua neta entre la fase líquida y la fase de vapor hasta que se alcanza un equilibrio entre las dos fases. Este equilibrio se controla pesando la muestra con cierta frecuencia hasta que el peso se estabilice.

Figura 7. Montaje experimental para imposición de succión controlada en muestra de ensayo



1. Muestra de suelo, 2. Desecador,
3. Soporte, 4. Solución salina

Fuente: Tang y Cui (2005)

²⁸ MELO Xiomara. Op Cit. 2010. P 43

²⁹ TANG A, CUI Y. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. En: Canadian Geotechnical Journal 42: 2005 pp. 287–296

De acuerdo con lo expuesto, se obtienen diferentes succiones totales imponiendo diferentes humedades relativas mediante la variación del tipo y la concentración de la solución salina empleada. En la Tabla 10 se presentan la humedad relativa, u_v/u_{v0} , y la succión, Ψ que se obtendría empleando diferentes soluciones en las concentraciones indicadas, solubilidad.

Tabla 10. Propiedades de soluciones Saturadas

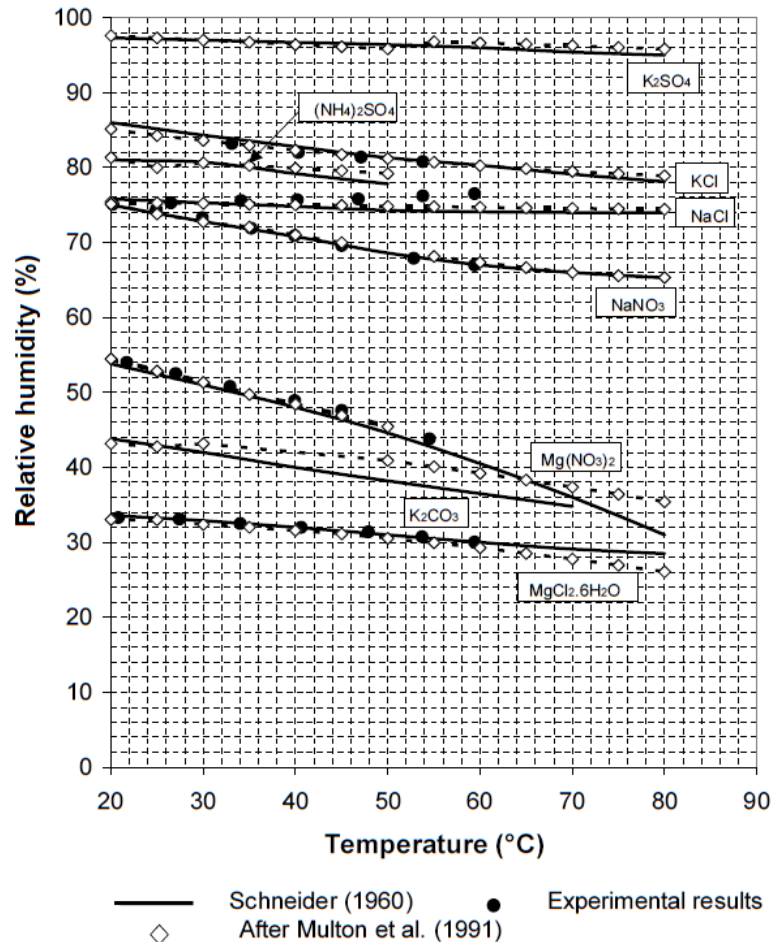
Compound	T (°C)	A (%)	B (K)	u_v/u_{v0} (%) a 25° C	Ψ (Mpa) a 25° C	Solubility (g/100 g H ₂ O) 30° C
NaOH H ₂ O	15-60	5.48	27	6	386	113
LiBr 2H ₂ O	10-30	0.23	996	6	386	193
ZnBr ₂ 2H ₂ O	5-30	1.69	455	8	347	529
KOH 2H ₂ O	5-30	0.014	1924	9	330	128
LiCl H ₂ O	20-65	14.53	-75	11	303	86
CaBr ₂ 6H ₂ O	11-22	0.17	1360	16	251	170*
LiI 3H ₂ O	15-65	0.15	1424	18	235	170
CaCl ₂ 6H ₂ O	15-25	0.11	1653	29	170	97*
MgCl ₂ 6H ₂ O	5-45	29.26	34	33	152	57*
NaI 2H ₂ O	5-45	3.62	702	38	133	192
K ₂ CO ₃ 2H ₂ O	20			44	112	113
Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	10-30	1.89	981	51	92	156
Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	5-35	25.28	220	53	87	74*
NaBr ₂ 2H ₂ O	0-35	20.49	308	58	75	98
NaNO ₂	20			66	57	88
KI	5-30	29.35	254	69	51	153
SrCl ₂ 6H ₂ O	5-30	31.58	241	71	47	57*
NaNO ₃	10-40	26.94	302	74	41	95
NaCl	10-40	69.2	25	75	39	36
NH ₄ Cl	10-40	35.67	235	79	32	41
KBr	5-25	40.98	203	81	29	71
(NH ₄) ₂ SO ₄	10-40	62.06	79	81	29	78
KCl	5-25	49.38	159	84	24	37
BaCl ₂ 2H ₂ O	5-25	69.99	75	90	14	38
ZnSO ₄ 7H ₂ O	20			91	13	62
CsI	5-25	70.77	75	91	13	95
KNO ₃	0-50	43.22	225	92	11	46
CuSO ₄ 5H ₂ O	20			97	4	24*
K ₂ SO ₄	10-50	86.75	34	97	4	13

* Solubility Values possibly affected by soil phase changes, usually from one hydrated phase to another or from hydrate to the anhydrous solid

Fuente: Romero (2001)

El efecto que tienen cambios de temperatura en la humedad relativa para varias soluciones salinas empleadas comúnmente en investigación de suelos parcialmente saturados, no es drástico como se supone, lo que parece evidente al observar la Figura 8.

Figura 8. Cambio de la humedad relativa frente a la temperatura para diversas soluciones salinas



Fuente: Tang y Cui (2005).

3.1.2.2 Métodos para medir succión y uso

Rodríguez (2014)³⁰, describió que la base para clasificar una u otra técnica de medición de la succión, es el contacto del dispositivo o instrumento con el agua de

³⁰ RODRÍGUEZ Edgar. Tesis de maestría en geotecnia. Evaluación del comportamiento geomecánica de arcillas en el sector de Campo Alegre- ciudad de Barranquilla. Universidad Nacional de Colombia. 2014. Bogotá. pp. 54

los poros. Cuando se presenta contacto se mide la succión matricial por flujo de agua líquida; en caso contrario se mide la succión total por flujo de vapor de agua. Con cualquier tipo de medición es necesario dejar transcurrir un periodo de tiempo suficiente para alcanzar equilibrio entre el suelo y el dispositivo o instrumento de medida.

En esta investigación se aplicaron las técnicas del papel de filtro en contacto con la muestra (medición de succión) y equilibrio de vapor en desecador (control de succión), las cuales serán descritas a continuación.

- Método del Papel Filtro.

Bicalho (2007)³¹, señaló que el método del papel de filtro para la medición de la succión del suelo ha sido usado principalmente en la práctica profesional de la geotecnia desde 1979. Debido a las dificultades presentadas en la medición directa de la succión matricial, este método se presenta como un método simple y económico de laboratorio, con un alto grado de aproximación.

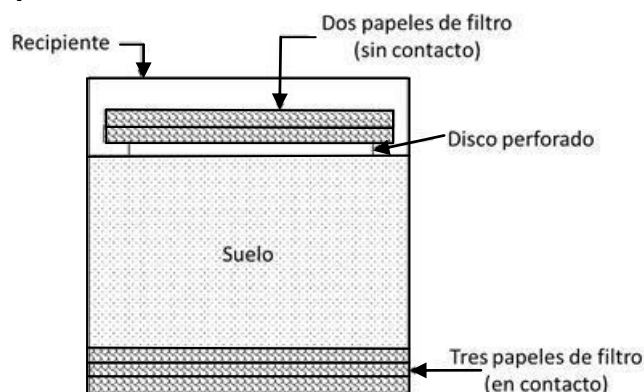
Desde un punto de vista teórico, es posible usar el papel de filtro para medir tanto la succión total como la succión matricial de un suelo. Rodríguez (2014)³², describió que este método se basa en la suposición de que el papel de filtro entra en equilibrio (con respecto al flujo de agua) con un suelo a un valor específico de succión. El equilibrio puede alcanzarse por intercambio de vapor o intercambio líquido entre el suelo y el papel de filtro. Cuando un papel de filtro seco es colocado en contacto directo con el espécimen de suelo se asume que hay flujo de agua desde el suelo al papel hasta alcanzar un equilibrio (Figura 9). Cuando un papel filtro es suspendido por encima del espécimen de suelo (sin contacto directo con el suelo), ocurre flujo de vapor de agua desde el suelo hacia el papel hasta alcanzar el equilibrio (Figura 9). En condiciones de equilibrio el papel y el suelo tendrán el mismo valor de succión. Cuando se alcanza el equilibrio se mide el contenido de agua gravimétrico del papel. El contenido de agua del papel es convertido a succión usando la curva de calibración de acuerdo con el tipo de papel usado.

Ésta es la metodología básica sugerida por la ASTM D 5298 para la medida de la succión matricial usando el papel de filtro. Esta norma técnica emplea una única curva de calibración para la medida tanto de la succión matricial como de la succión total.

³¹ BICALHO K, et al.. Filter paper method of soil suction measurement. En: Panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 13. Isla Margarita, Venezuela, 2007.

³² RODRIGUEZ Edgar. Op Cit. 2014. p 56

Figura 9. Método de papel filtro en contacto y sin contacto para medir la succión matricial y total, respectivamente



Fuente: Rodríguez (2014).

Para asegurar una buena transferencia de agua en la medición de succión matricial debe asegurarse un buen contacto entre el suelo y el papel filtro. Es importante anotar que para esta técnica deben usarse solo papeles filtro libres de ceniza, los más comunes son el Whatman 42 y Schleicher & Schuell 589 banda blanca. Según Rodríguez (2014)³³, se considera que los discos de papel de la misma marca son iguales, por lo que no es necesario determinar diferentes curvas de calibración para cada ensayo. La curva que propone la ASTM para el Whatman 42 es la definida por Fawcett y Collis - George (1967) presentada por Fredlund y Rahardjo (1993), en la Tabla 11 se presentan algunas de las curvas de calibración propuestas para el papel de filtro Whatman 42; la mayoría de las curvas son bilineales con un punto de inflexión ocurriendo en contenidos de agua entre el 30 %– 50 %.

Tabla 11. Curvas de calibración del papel filtro Whatman 42

Referencia	Succión	W (%) rango	Log 10 succión (kPa)
ASTM D5298	Total y Matricial	W < 45,3	5,327 - 0,0779 w
ASTM D5298	Total y Matricial	W > 45,3	2,412 - 0,0135 w
Chandler & Gutiérrez (1986)	Matricial	(*)	2,85 - 0,0622 w
Chandler et al (1992)	Matricial	W < 47	4,842 - 0,0622 w
Chandler et al (1992)	Matricial	W > 47	6,050 - 2,48 Log w
Oliveira & Marinho (2006)	Total y Matricial	W < 33	4,83 - 0,0839 w
Oliveira & Marinho (2006)	Total y Matricial	W > 33	2,57 - 0,0154 w

W= CONTENIDO DE AGUA GAVIMETRICO

(*) rango de succión (80 kPa – 6000 kPa) -

Fuente: Rodríguez (2014).

³³ RODRÍGUEZ Edgar. Op Cit. 2014. p 45

El método de ensayo presentado adaptado del Imperial College of London y ampliamente usado en la Universidad Nacional de Colombia, consiste en colocar una hoja de papel de filtro en contacto con la superficie lisa del suelo y recubrir con un elemento liso y liviano (material acrílico). El conjunto formado por el suelo, el papel de filtro y la cubierta de material acrílico, se envuelve y sella completamente, y se coloca en ambiente de temperatura controlada, mientras la succión del papel y el suelo se equilibra. La variación de la temperatura en este proceso no debe superar ± 1 °C. Después de una semana la muestra se destapa y se mide el contenido de agua del papel de filtro, secando en el horno a 105 °C por tiempo de dos horas. Para evitar la pérdida de agua del papel de filtro, todo el procedimiento debe hacerse con pinzas y guantes quirúrgicos, y la operación de pesaje debe ser hecha muy rápidamente y protegiendo el papel con un recipiente impermeable al aire. En este método es fundamental controlar la precisión de la medida del contenido de agua del papel de filtro. Se calcula que el error es aceptable cuando la sensibilidad de la medida es 0,0001 g. Debe observarse la coherencia entre el proceso de calibración del papel y el proceso de cambio de contenido de agua que experimenta durante la medición de la succión, ya que siendo el papel un medio poroso, no tiene la misma capacidad de retención de agua cuando se humedece y cuando se seca. Como la mayoría de las curvas de calibración se han obtenido en procesos de humedecimiento del papel, se recomienda que al iniciar el ensayo el papel se coloque en estado seco al aire.

- **Curva retención de agua (CRA)**

En un suelo o roca a cada valor de contenido de agua corresponde un valor de succión; una curva que relacione estas dos variables se conoce como curva de retención de agua. El grado de saturación o el contenido de agua gravimétrico (en peso) son usados frecuentemente para definir la curva de retención.

Dado que la curva presenta una parte en la cual una pequeña variación del contenido de agua está asociada con un cambio bastante amplio de la succión, se prefiere dibujar el logaritmo de la succión contra el contenido de agua. La CRA es una herramienta conceptual e interpretativa para entender el comportamiento de suelos parcialmente saturados.

Como el suelo se mueve desde estado saturado a estado seco, la distribución de las fases de suelo, agua y aire cambian tal como el estado de esfuerzos cambia. La relación entre estas fases influencia de diferentes formas el comportamiento del suelo.

3.2 MARCO REFERENCIAL

Las rocas lodosas son geomateriales que están siendo caracterizados por su interacción con obras de ingeniería, cada roca lodosas tiene características que están íntimamente relacionadas con su mineralogía y génesis. Entre los factores

que influyen en la pérdida de resistencia de las rocas lodosas se encuentra el efecto de los ciclos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (cambios de humedad y temperatura), a continuación se describe las principales referencias bibliográficas y de investigación que involucran los temas mencionados.

3.2.1 Procesos que afectan las rocas lodosas

Alarcón (1976)³⁴, elabora la primera caracterización de las rocas lodosas sobre Lutitas, estas ante el efecto del agua mediante la aplicación del ensayo de desleimiento de JAR test, identificando que las Lutitas en Colombia, son materiales desleíbles y que tienen una característica que deben ser estudiadas a profundidad para evaluar su comportamiento cuando son saturadas.

Según Correa (2013)³⁵, existe la necesidad de evaluar las características físicas y mecánicas de las rocas intactas, que es un escollo que lastimosamente conlleva a tomar datos de fuentes en la mayoría de las veces foráneas. Se debe presentar la clasificación ingenieril de las rocas colombianas mediante la metodologías fundamentada en los parámetros de resistencia a la compresión simple, el módulo de deformación al 50% de σ_c y la relación de módulos; de esta manera se logró realizar el procedimiento en la caracterización de centenares de muestras provenientes de proyectos civiles e investigaciones en proyectos de alto grado, entre rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Teniendo en cuenta la consecución de las indagaciones del anterior investigador, se encontró en la caracterización geomecánica de rocas colombianas para diversos estudios y/o proyectos, muestras ensayadas donde la Resistencia a la Compresión Uniaxial (σ_c) de las lutitas en Colombia oscilan en un franja de entre 50 y 7.8 MPa y los Módulos de Elasticidad entre (E_t) entre una franja de 15 y 1.3 GPa, frente a valores de 185 a 19 MPa en resistencia y 30 a 2.4 GPa, para Dreere y Miller (1966), en lutitas de Estados Unidos. Los resultados dejan ver que las rocas con la misma descripción de composición mineralógica pueden tener resultados variables y alejados, donde las lutitas de la superficie de Colombia están clasificadas entre media y muy baja resistencia, frente a resistencia clasificadas como muy alta a baja en otros lugares del mundo.

Deere y Patton (1976)³⁶, recopilaron estudios sobre las características de los taludes de suelos y rocas meteorizados en los medios tropicales donde la temperatura y la humedad son los principales agentes ambientales de la alteración de los perfiles de rocas; entre los materiales caracterizados están los tipo shale,

³⁴ ALARCON Adolfo. Tesis de pregrado en Ingeniería civil. Bases para el estudio geotécnico de Lutitas en Colombia. Universidad Nacional de Colombia 1976.

³⁵ CORREA Álvaro. Serie completa de los métodos recomendados por la ISMR para la caracterización de rocas en laboratorio. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá. 2013. pp 387

³⁶ DEERE D, PATTON F. Op Cit. 1976.

que presentan según datación de Skempton una profundidad de alteración de hasta 14 m para los shales London.

El perfil de meteorización según Bjerrum para distintas zonas de desintegración en los shales arcillosos, debido a las condiciones climáticas. Identificó que la meteorización disminuye con la profundidad, la zonas no son consistentes y de fácil reconocimiento.

3.2.2 Efecto de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento en rocas.

-Zhang et al (2015)³⁷, realizaron el estudio de durabilidad de los materiales usados para la construcción de la presa de Zha Du, se analiza la limolita arcillosa que es utilizada como relleno para construcción de la misma. La roca se considera susceptible a la meteorización, el comportamiento a largo plazo es de preocupación. La investigación experimental de laboratorio fue iniciado para investigar el comportamiento de deformación y y resistencia al corte de la roca medido bajo esfuerzos, humedecimiento/secado y temperatura.

La precipitación registrada y temperatura del aire en el sitio de la presa, con temperaturas alta y bajas de 38° C y 4° C, respectivamente. La precipitación anual promedio es 1008.8 mm. La roca tiene una composición de entre el 30 % - 40 % de mineral arcilloso.

En el modelo la temperatura fue variada de entre 10° C a 56° C, las muestra sometida tanto para los ciclos de secado-calentamiento como de enfriamiento-humectación, la humectación se realizó mediante inmersión hasta la saturación del material, proceso repetido hasta 70 ciclos.

La combinación de esfuerzos, el agua y la meteorización térmica intensifica la degradación del material, en término del ablandamiento en la humectación, agrietamiento en el secado y el colapso estructural bajo esfuerzos. La tasa de degradación de la resistencia se calculó en 16.4% que es altamente significativo.

- Wen. et al (2017)³⁸, Analizaron el modo de fractura ante el ensayo de tracción Brasileiro en areniscas de Ziyang City- China, durante la aplicación de ciclos de humedecimiento/secado, los ciclos se lograron a través de la inmersión durante 24

³⁷ ZHANG B; ZHANG, J y SUN, G. Deformation and shear strength of rockfill materials composed of soft siltstones subected to stress, cyclical drying/wetting and temperature variations. En: Engineering Geology. Marzo, 2015. Vol.190. p 87-97.

³⁸ WEN, Hua et al. Experimental investigation on the effect of wetting/drying cycles on mixed mode fracture toughness of sandstone. En: Internacional Journal of Rock Mechanics y Mining Sciences. 2017. vol 93. p. 242-249.

horas de los especímenes, posteriormente se dejaron en condiciones atmosféricas por 48 horas y finalmente el secado a temperatura media de 105° C.

El grado de degradación de la resistencia es mayor con el aumento de los ciclos de humedecimiento/secado, la aplicación de la carga a un ángulo de 10° es más significativa que la aplicación a 10°.

-Mojtaba h. Et al (2017)³⁹, realizaron la comparación de la eficiencia en la aceleración de la meteorización de procesos como congelación-descongelación, choque térmico, cristalización de sales, disolución y humectación-secado, para pronosticar el grado de alteración de algunas piedras de tres sitios históricos, templo Anahita, relieves Anobanini y relieves Eshkaft-e Salman, Corrí. Los efectos combinados de los procesos naturales de intemperismo, calefacción y refrigeración, humectación y secado, y congelación y descongelación, y la información climática; se utilizaron, para evaluar los grados de meteorización natural.

Las propiedades medidas son la porosidad, velocidad de onda-P y la resistencia a la tracción mediante ensayo Brasileiro. El choque térmico se logra en 40 ciclos donde se lleva la muestra a 105°C por 18 horas, inmediatamente se sumergen en agua a temperatura ambiente por 6 horas. Los ciclos artificiales de humedecimiento/secado se aplican según el ensayo de slake durability test.

Los grados de intemperismo natural fueron multiplicados por coeficientes de efecto de tiempo para obtener grados de meteorización natural más realistas de los monumentos. Los grados de intemperismo natural pronosticados para el Templo de Anahita, los relieves de Anobanini y los Salmanreliefs de Eshkaft-e son 56%, 61% y 47 %, respectivamente.

-Sobre las rocas volcánicas de los Andes centrales Chilenos, Vergara M. y triantafyllidis T (2017)⁴⁰ realizaron el proceso de humedecimiento/secado, encontrando el impacto en el hinchamiento de las rocas. La hinchazón se midió con el ensayo edométrico adaptado para tal fin, y lograr modificar las condiciones de humedad de las muestras. Logrando medir la deformación durante su humectación y secado.

Las deformaciones aumentan a medida que aumentan los ciclos de humedecimiento/secado, con hasta 84 cambios realizados.

³⁹ MOJTABA, Heidari et al. Application of fuzzy inference system for determining weathering degree of some monument stones in Iran. En: Journal of Cultural Heritage .2017

⁴⁰ VERGARA, M. y TRIANTAFYLLIDIS T. Swelling behavior of volcanic rock under cyclic wetting and drying. En: Internacional Journal of Rock Mechanics y Mining Sciences, Agosto, 2017. Vol 80. P 231-240.

Los resultados de las pruebas indican un aumento de la hinchazón con ciclos de humectación y secado crecientes. Sin embargo, esto ocurre solo si se permite que la roca se expanda durante la fase de humectación. Una razón probable de este fenómeno es la ruptura y desagregación de la roca durante la hinchazón, lo que permite un mayor volumen de partículas de arcilla, para adsorber agua en el siguiente ciclo de humectación. Esto se confirmaría por la pérdida de fuerza y rigidez evaluada después de la prueba. Los resultados experimentales también mostraron que el comportamiento de hinchamiento no es reversible en estas condiciones debido a cambios en la estructura de la roca.

-Zhang D. Et al (2015)⁴¹, determinaron para la roca lodosa Purple que la temperatura se considera un factor clave que influye en la desintegración de las rocas, al predecir cuantitativamente la tasa de la desintegración de la roca a una temperatura variada durante las condiciones del ciclo de humectación-secado.

Se surten dos tratamientos: temperatura constante y alternada, los niveles se establecieron en 10, 20, 30, 40, 50, 60 Y 76 °C, las temperaturas alternantes se modificaron entre los máximos y mínimos, estas son basadas en las mediciones en aire (2° C a 40° C) y del suelo (-5° C a 76° C). Las muestras fueron sumergidas en agua para ser saturadas y sacadas posteriormente para ser secadas durante la fase experimental. Las muestras de temperatura alterna constaron de un congelamiento a -5° C y posteriormente un calentamiento hasta los 40° C, y del mismo modo se usaron las temperaturas de 2° C a 76° C.

Zhao Y et al⁴², Realizaron ensayos de laboratorio con ciclos de humedecimiento-secado, donde midió la estructura de poros y las propiedades geo mecánicas. Encontraron que el cambio de la resistencia de los geomateriales estudiados estaba relacionado con el aumento de poros, siendo este el principal efecto de realizar cambios de humedad en el material. Los procesos de cambios de humedad hacen que el material tenga deformación interna por el aumento y disminución del volumen de minerales, lo que crea fracturas internas y con ella una mayor porosidad del geomaterial.

Con base en las anteriores investigaciones se estableció que la tasa de descomposición aumenta con el aumento de la temperatura y la diferencia entre temperaturas extremas, adicionalmente la congelación y descongelación pueden provocar la fractura de la roca cuando está saturado.

⁴¹ ZHANG, D. et al. Quantitative determination of the effect of temperatura on mudstone decay during wet-dry cycles: a case study of "purple mudstone" from south – western China. En: Geomorphology. Junio, 2015. Vol. 246. P 1-6

⁴² ZHAO Y et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain. En: Constr. Build. Mater. Diciembre 2018. Vol **191**. pp 923–31

Adicional se precisó que las rocas colombianas son más deformables y menos resistentes como lo demostró Correa (2013). Para Flores (2003)⁴³, este hecho se debió a parámetros tales como la textura, estructura, composición mineralógica y porosidad, así como a la edad de la roca, las formaciones geológicas a las que pertenecen, la actividad sísmica y tectónica a las que fueron sometidas luego de la orogenia Andina, constituyendo los relieves y modelados la cordillera Oriental, siendo esta la última en levantarse sobre los mares someros y la acreción del límite en el océano Pacífico.

Las investigaciones hasta el momento mencionadas, realizaron cambios de humedad y temperatura de forma brusca (inmersión en agua y secado al horno a 110° C), procesos que son acertados para rocas con grados de competencia alto; toda vez que, la estructura y resistencia de las rocas soporta estos cambios sin generar efectos importantes. Pero las rocas lodosas debido a sus características particulares no resulta conveniente la aplicación este tipo de procesos, además de no ser representativos con los cambios de humedad y temperatura a los que se ven sometidos estos geomateriales en climas tropicales.

Considerando particularidad de las rocas lodosas, Torres et al (2014)⁴⁴, hondaron en el estudio de estos materiales que al ser considerados como rocas tipo suelo por su falta de cementación y su degradabilidad ante efectos de meteorización física, requieren un tratamiento ajustado que colocara en funcionamiento la aplicación de ciclos de humedecimiento/secado controlados.

Esta investigación buscó dilucidar parte el fenómeno de degradación de las rocas lodosas laminadas de los Andes colombianos, considerando que son materiales bastante complejos, y que pretender determinar por completo su comportamiento resultaría incierto en caso que a ello se llegara, ya que la integración del comportamiento en las diversas escalas, está aún en sin tamizar.

El escalamiento en las variables ambientales y sus efectos en el comportamiento geomecánico de rocas se logró mediante la implementación de la técnica del equilibrio de vapor (VET), debido a que afecta al material en relación directa a la escala en que éste se encuentre y por lo tanto es viable considerar que lo experimentado por el material en el laboratorio, es proporcional a lo que es sometido el material in-situ; en este sentido, la aplicación de este procedimiento metodológico arrojó resultados satisfactorios.

⁴³ FLOREZ Antonio. Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2003.

⁴⁴ TORRES-SUAREZ M C, ALARCON-GUZMAN A and BERDUGO-DE MOYA R 2014. Effects of loading–unloading and wetting–drying cycles on geomechanical behaviors of mudrocks in the Colombian Andes EN: J. Rock Mech. Geotech. Eng. junio 2014. Vol 6. p 257–6.

La novedad con respecto a las técnicas tratadas con anterioridad, se refieren a la aplicación de ciclos humedecimiento–secado mediante la técnica de equilibrio de vapor (VET); es decir, sin necesidad de sumergir los especímenes en agua, tal como es la práctica común a la hora de caracterizar la propiedad de desleimiento en rocas arcillosas.

Las investigaciones hasta aquí expuestas, han abordado el comportamiento de las rocas ante cambios de humedad y temperatura de manera individual, asando tratamientos vetustos con inmersión en agua y secado a horno, técnicas aptas para geomateriales con resistencias competentes. Sin embargo, para las rocas lodosas de resistencias bajas, la aplicación de la técnica de equilibrio de vapor es idónea, ya que impone la transición de humedad en lapsos de tiempo similares a los cambios climáticos del material in-situ. El efecto de los cambios de temperatura en rocas lodosas no ha sido abordado aun, tampoco la consecuencia simultanea de los dos mencionados agentes de meteorización física.

Vinculadas las características únicas de las rocas en los Andes Colombianos, y los cambios de la resistencia de los materiales rocosos al estar expuestos a los embates medio ambientes de la litosfera; esencialmente, los cambios de humedad y temperatura. La posterior etapa experimental y el análisis de resultado de la presente investigación, abordó el efecto de los ciclos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento en el comportamiento geomecánico de la roca lodosa, aplicando ambientes controlado y similar a los que se registran en la zona donde yacen dichos materiales.

4. ETAPA PRE-EXPERIMENTAL

Esta etapa permitió la definición de procedimientos y condiciones particulares para el desarrollo de la investigación. En esta etapa se incluyó el muestreo de la roca lodosa, las características físicas y mineralógicas y la calibración de la técnica de equilibrio de Vapor (VET), siendo este último el punto de partida para lograr la meta física que se persiguió.

4.1 MUESTREO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Fueron extraídos bloques de roca del punto de estudio previamente referenciado y caracterizado. Los bloques desencajados son del mismo plano horizontal estratigráfico, a fin de conservar la homogeneidad y reducir la incidencia de la disparidad por efecto de las presiones diagenéticas del tiempo geológico.

Se obtuvieron cilindros de roca de diámetro de 34 mm con una relación altura/diámetro de 2,0 a 2,2, en cumplimiento de la norma ASTM D7012 14e1⁴⁵, se perforó con equipo saca-núcleos desde el techo del bloque a muestrear. Para extraer los testigos de roca lodosa en cumplimiento con la norma citada con anterioridad, fue importante priorizar el cumplimiento de la relación altura/diámetro; lo anterior, teniendo en cuenta la separación de las discontinuidades y laminación de la roca, que en la práctica dificulta la extracción de núcleos de roca en diámetro mayor a los obtenidos aquí. El proceso es detallado en las Figura 10.

Figura 10. Extracción cilindros de roca. (a) Bloque-campo, (b) Núcleos- laboratorio



Fuente: Autor.

⁴⁵ ASTM D7012–14e1: Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Conshohocken, PA, 2014

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA LODOSA

Las propiedades físicas y mineralógicas son de gran importancia para conocer el material sobre el cual se va efectuar la presente investigación. Como se ha mencionado, en anteriores apartados de este libro las rocas lodosas y su comportamiento depende mucho de su composición mineralógica y la génesis; por ende, es importante enmarcar sus principales características a fin de estacionarlas frente a otras investigaciones.

4.2.1 Propiedades físicas

Se realizaron los principales ensayos de caracterización física sobre la roca, correspondientes a densidad seca, relación de vacíos, gravedad específica y humedad natural, cada ensayo fue elaborado siguiendo las indicaciones y recomendaciones del ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. Complementariamente al análisis de las fases de la roca, se realizó el ensayo de límites de Atterberg a fin de enmarcar los suelos provenientes de la roca lodosas. Los resultados de los ensayos son presentados en el Anexo 1 y el promedio de los resultados son mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados promedio de las propiedades físicas de la roca lodosas

Gravedad específica	Densidad seca (Kg/m ³)	Relación de vacíos (%)	Limite liquido (%)	Indice Plasticidad (%)
2,77	2377	15,1	25,7	6,3

Fuente: Autor

La humedad natural de la roca varía entre el 4,1 % y 4,5 %, correspondiente a la humedad de muestras irregulares in-situ. La humedad máxima al 100 % de saturación de la muestra, corresponde a 5,1 %.

Con el propósito de complementar la caracterización de propiedades de consistencia de rocas lodosas, se adelantaron varias series de ensayos denominados desleimiento – durabilidad mediante una técnica que resulta ser práctica, permitiendo identificar el potencial de desleimiento (ablandamiento acompañado de algún tipo de desprendimiento de partículas, lo que se conoce como degradabilidad), en forma ágil y de aplicación simple.

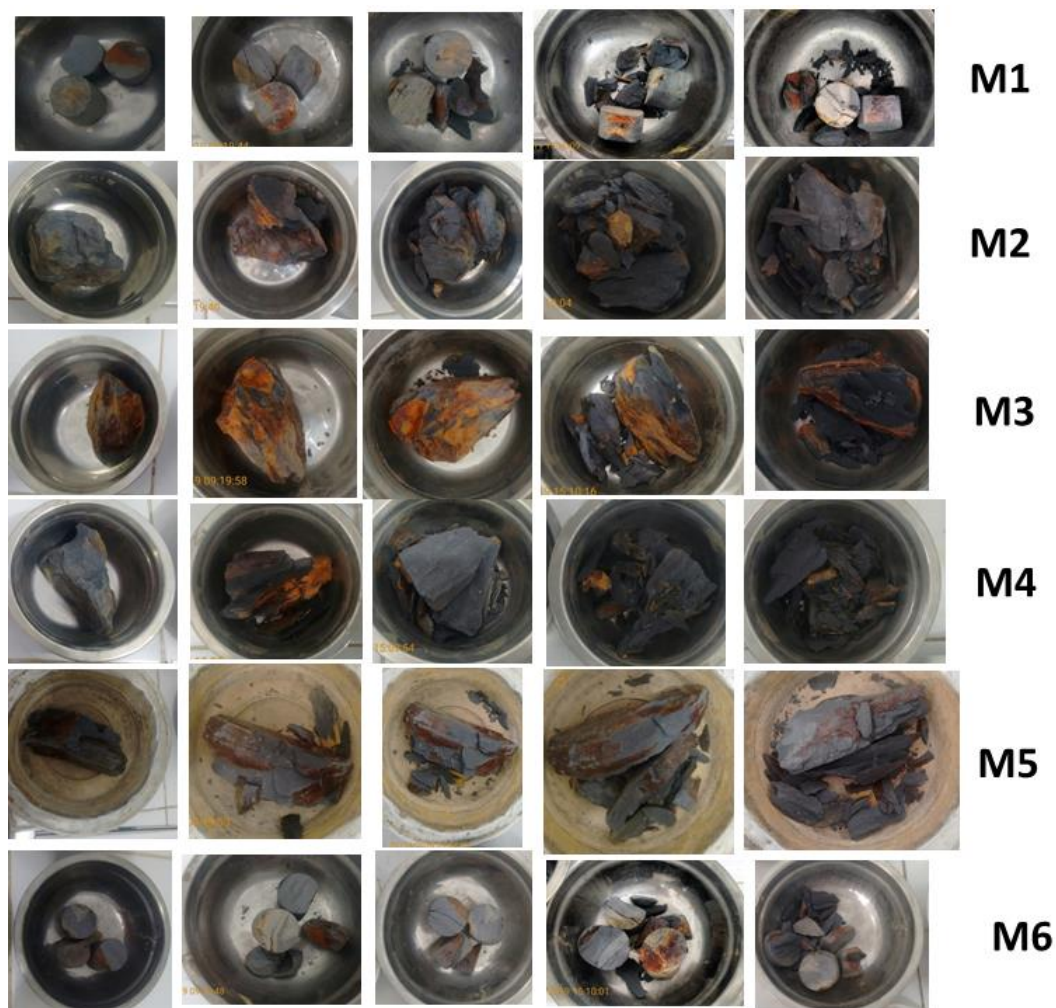
El procedimiento implementado es conocido como la técnica de Wood y Deo's modificada(1975)⁴⁶, consistió en sumergir una serie de fragmentos de roca en agua destilada durante un período de tiempo de 24 h, seguido por un secado al horno durante igual período de tiempo, para posteriormente ser lavado en el tamiz

⁴⁶ WOOD, L.E. & DEO'S, P.. A suggested system for classifying shales materials for embankments. Bulletin of The Association of Engineering Geologist, 1975 Vol. 12, No. 1, pp. 39-55.

de 2,0 mm de abertura (# 10). Las pérdidas de material en cada uno de estos ciclos de humedecimiento – secado indican el índice de desleimiento y su valor complementario es una medida de su durabilidad.

Más que el valor del índice como tal, el cual tiene propósitos meramente indicativos y sólo permite realizar algunos análisis comparativos entre muestras de otras formaciones. Los resultados tienen poca aplicabilidad ingenieril, puesto que no permite realizar un seguimiento detallado de los procesos intrínsecos que conllevan a la degradación de la estructura del material. La Figura 11 muestra el proceso de degradación de 6 fragmentos de roca.

Figura 11. Proceso de degradación de 6 fragmentos de roca lodosa.



Fuente: Autor.

El índice de desleimiento (I_s) promedio al cabo de 5 ciclos es de 2,2 %, según los autores del ensayo, el valor corresponde a un índice bajo. Este índice indica que la

roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal no es desleíble al ponerse en contacto con el agua, connotarse que se encuentra cerca al límite de índice de desleimiento de muy bajo, correspondiente al 2%. Los valores son mostrados en el respectivo formato de laboratorio para dicho ensayo, Anexo 1.

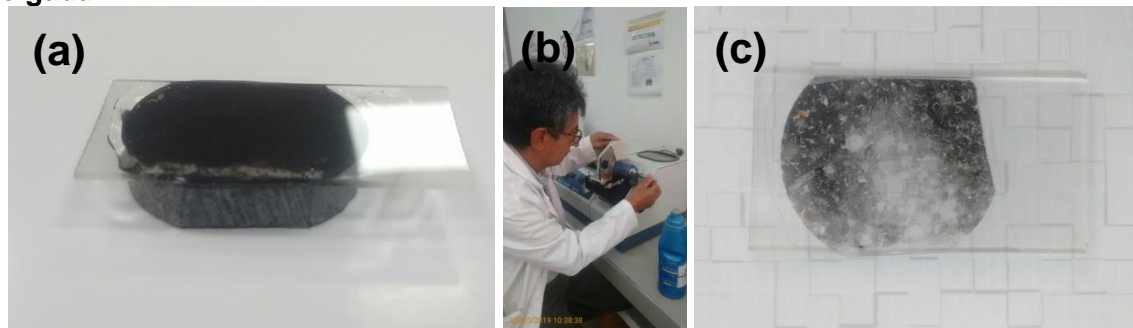
4.2.2 Propiedades mineralógicas

Las propiedades mineralógicas se hallaron con la ejecución y análisis de los ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) y Secciones Delgadas a las muestra de la roca lodosa.

4.2.2.1 Secciones Delgadas

La sección delgada es una técnica que consiste en tallar una sección de espesor micrométrico con ayuda de resinas epóxicas que le otorgue cierta coherencia al material sin que pierda su integridad natural, obteniendo una lámina que pueda ser colocada en un lente óptico, permitiendo la identificación de componentes macro y el análisis morfológico a esta escala. Igualmente permite el establecimiento de ciertas relaciones geométricas como la determinación porcentual de sus componentes. Luego de aplicar el proceso descrito con anterioridad se presenta en la Figura 12.

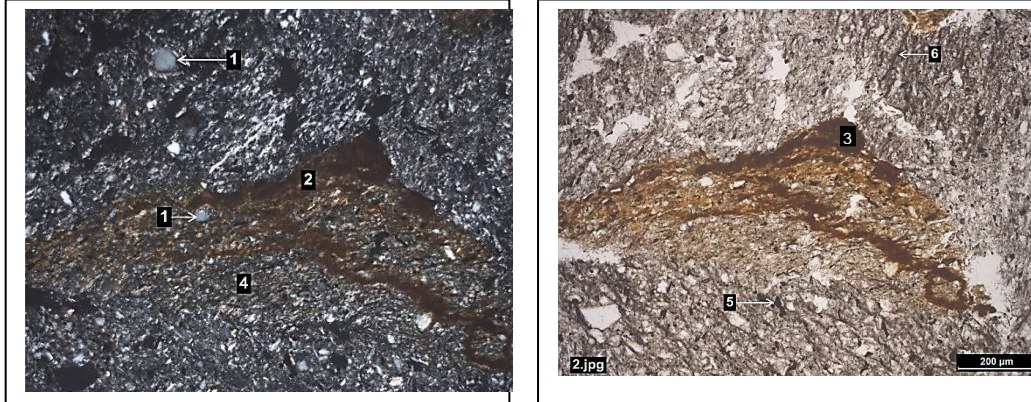
Figura 12. Elaboración de sección delgada de roca lodosa. (a) Preparación de muestra en lamina, (b) pulido hasta obtener sección delgada de 20 μm , (c) sección delgada



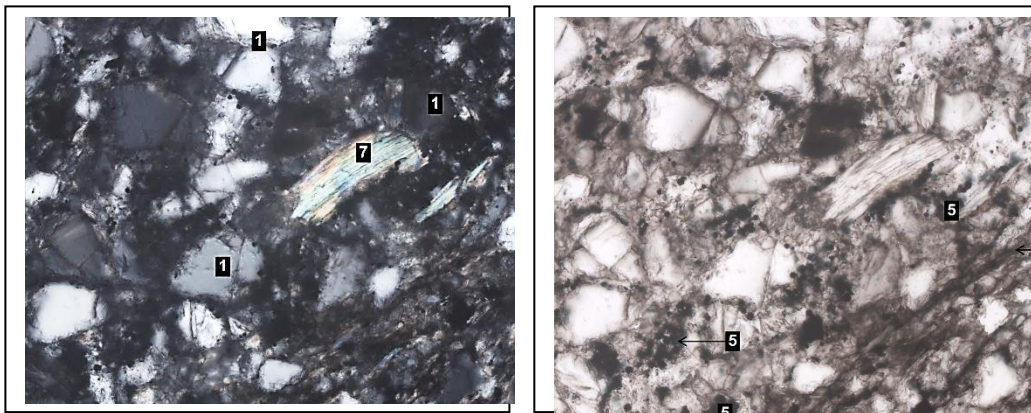
Fuente: Autor.

El análisis de la sección delgada se identificó que la muestras rocosa posee las siguientes características; en la escala macroestructural la textura composicional es clástica-arcillosa de color gris medio, la partición es laminar y con fisilidad pobre. La medición de tamaños de grano la composición promedio fue de 89 % de tamaños menores de (5 μm) y 10 % de tamaños cercanos a (50 μm), por consiguiente, el tamaño de partícula tipo limo es menor que el 1/3, considerando el material como un shale arcilloso (ver Tabla 13). El resumen de las fotografías de secciones delgadas es presentado en la Figura 13, el informe petrográfico de secciones delgadas es encontrado en el Anexo 2.

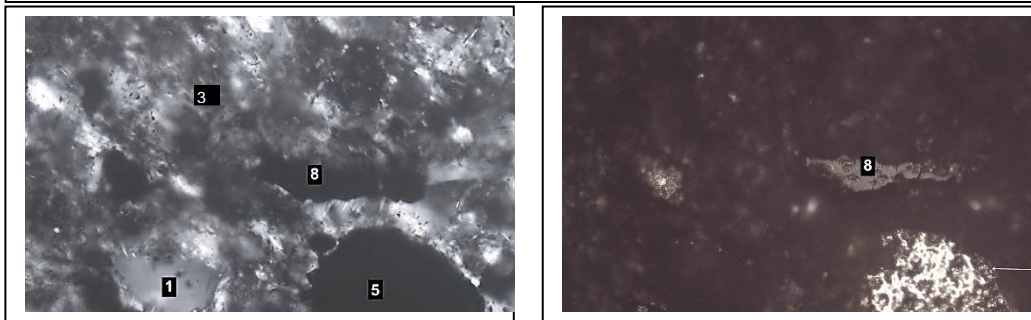
Figura 13. Fotografías ópticas de las secciones delgadas de una roca lodosa



Micrografía panorámica ilustrando relación, granulometría y forma de los componentes. Cuarzo (1), goethita (2) arcilla (3), shamosita (4) opacos –pirita- (5), opacos – materia carbonosa- (6) Nícoles cruzados y paralelos (XPL Y PPL) respectivamente. Aumento 100X



Micrografía detalle ilustrando componentes: cuarzo (1), moscovita (7), opaco – pirita - (5). Nícoles cruzados y paralelos (XPL Y PPL) respectivamente. Aumento 200X



Micrografía detalle ilustrando componentes: cuarzo (1), arcilla (3), opaco –pirita-(5), bitumen (8). Nícoles cruzados y paralelos (XPL Y PPL), luz transmitida y reflejada respectivamente.

Fuente: Autor.

Los minerales encontrados en la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal son; cuarzo, moscovitas, chamosita, minerales arcillosos reducidos, y minerales opacos como carbonosos y piritas son de menor cantidad, los resultados de los tamaños medios medidos con el metodo de cuadrícula de secciones delgadas y el porcentaje que correspondiente de cada mineral pueden ser detallados en la Tabla 13.

Tabla 13. Tamaño y porcentaje distribuido en la sección delgada

Mineral	Tamaño (µm)	% en sección delgada
Cuarzo	20-70	9.5
Moscovita	20-120	8.2
Shamosita	<30	2.2
Arcilla	<5	71.6
Pirita	<80	4.15
OM	<50	4.15

Fuente: Autor.

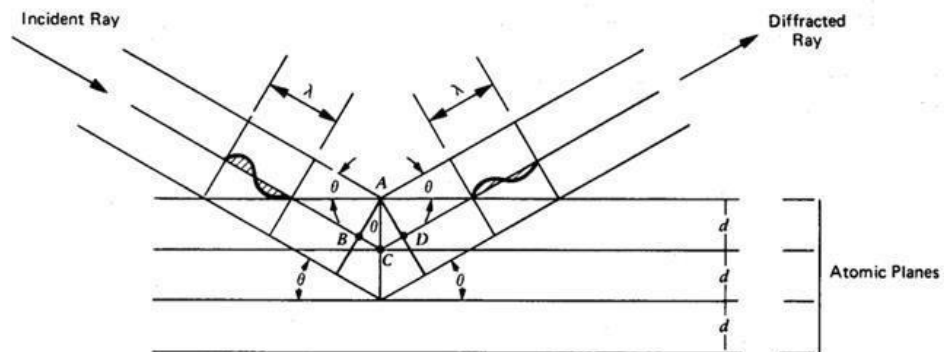
4.2.2.2 Difracción de rayos X (DRX)

Con este ensayo se determinó la composición mineralógica del material, mediante un análisis espectral de diversas reflexiones de los materiales. Esta técnica según Barceinas y Juarez (2001)⁴⁷, consiste en impactar la muestra con una haz de rayo X que se difracta en diversos ángulos dependiendo del mineral que se encuentre en su recorrido y el ángulo de inclinación con el que se dé la difracción del haz, las reflexiones pueden ser hasta de tres modos {hkl} y en función de ellas se puede determinar el mineral presente a partir de modelos de difracción preestablecidos, de acuerdo con la ley de Bragg. Esta ley establece que la mitad del ángulo de difracción, es el ángulo entre el haz incidente y los planos cristalográficos en condición de difracción. En la Figura 14 se esquematiza la difracción de los rayos X, para los planos A-A" y B-B", separados una distancia intralaminar.

De la figura 14, se aprecia las variables como n siendo el número de reflexiones (por lo general se calcula para la primera, entonces $n = 1$), λ es la longitud de onda respectiva y θ el ángulo barrido durante el ensayo. Obteniendo la distancia cristalográfica entre planos y de conformidad con los patrones se determina los minerales presentes, a partir de los picos de las reflexiones.

⁴⁷ BARCEINAS A, JUÁREZ Hernández. Ciencia e ingeniería de los materiales – Capítulo 3: Ordenamiento atómico de los sólidos. J.D.O.

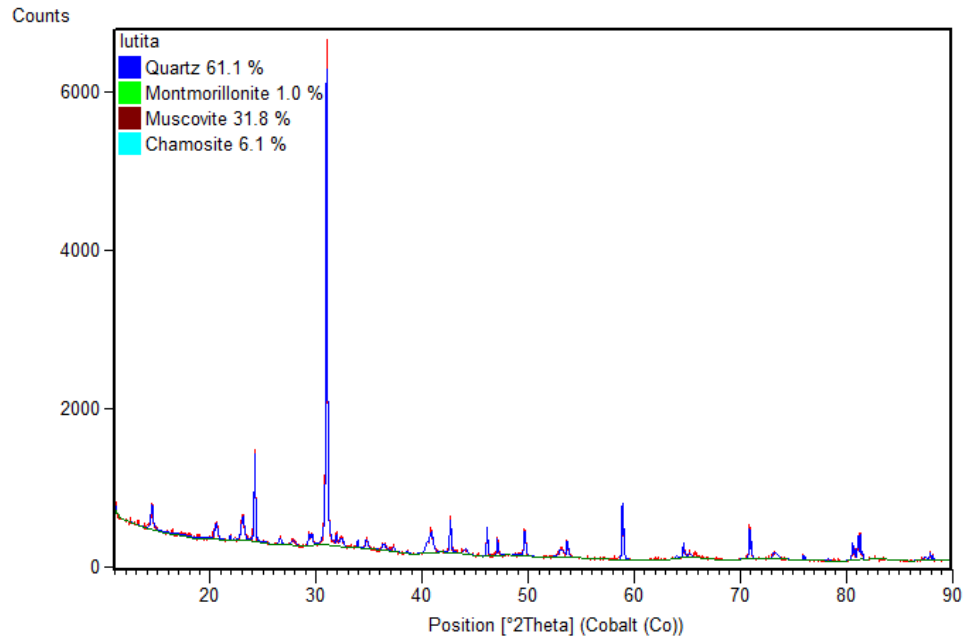
Figura 14. Condiciones geométricas para la difracción de rayos X según la ley de Bragg



Fuente: tomado de Barceinas A y Juárez Hernández

El ensayo de difracción de rayos X se realizó en condición de polvo desorientado, logrando una buena aproximación de los minerales interestratificados, el material de estudio se compone principalmente de minerales de grupo de los tectosilicatos como el cuarzo y filosilicatos como la moscovita, la mortmorillonita y Shamosita, el resumen de minerales los resultados es presentado en la Figura 15, el análisis del ensayo de DRX es presentado en Anexo 2.

Figura 15. Grafica completa de la roca en estudio, y el porcentaje de minerales



Fuente: Autor.

De la descripción mineralógica con DRX y análisis de sección delgada (petrografía), estableció una estrecha relación entre la microescala y la escala

intermedia denominada mesoescala. Comúnmente se proponen sistemas de clasificación simples como el referenciado en la Tabla 10; según el cual, el geomaterial estudiado es un shale lodoso, reuniendo la característica de laminación (shale) y la proporción de tamaño tipo limo versus arcilla mayor al 60 %; de aquí, puede preverse que no se espera un comportamiento altamente expansivo debido que la cantidad de minerales no arcillosos presentes considerados menores frente al volumen del mineral de cuarzo.

4.3 PRE-ENSAYOS PARA CICLOS DE HUMEDECIMIENTO/SECADO Y CALENTAMIENTO ENFRIAMIENTO

Para lograr el acondicionamiento y aplicación de los cambios de humedad y temperatura en laboratorio, se estableció inicialmente hondar en investigar las temperaturas y humedades a las que se veían sometidas las rocas lodosas en campo, para posteriormente reproducir esto en laboratorio, usando una metodología práctica.

4.3.1 Cambios de Temperatura experimentales

Las variaciones de temperatura de la roca expuesta a la intemperie dependen de la duración a los rayos de sol (insolación) y el enfriamiento en la noche. El anterior fenómeno transfiere energía que aumentan o disminuye la interacción de las partículas, manifestándose en un aumento o reducción de la temperatura. Para determinar con efectividad el cambio térmico, se dispone en el sitio de estudio de fragmentos de roca lodosa expuestos durante varios días a los embates del clima en la zona de estudio, la toma de dato se registra a las 5 Am y las 2 Pm, registrando datos de temperatura en los fragmentos mediante un termómetro laser (Xueliee GM320), los datos de campo son representada en la Figura 16. Estos resultados arrojaron valores de temperatura de insolación entre 42° C y 62° C, y temperaturas bajas entre los 6° C y 10° C.

Figura 16. Registro de temperatura con termómetro laser a) mínima y b) máxima



Fuente: Autor.

En laboratorio se realizó el montaje controlado del promedio de las temperaturas máximas y mínimas registradas en campo, de $8^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para la temperatura fría y $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para la temperatura de insolación. La instalación del montaje experimental se realizó en el laboratorio de suelos de la UPTC sede Tunja, siendo la temperatura ambiente promedio de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; en este lugar, se dispuso de un horno eléctrico análogo marca HUMBOLDT y una nevera digital marca INDUSTRIALES EVEREST, disponible para aplicar y mantener la temperatura máxima y mínima preestablecida.

4.3.2 Cambios de Humedad controladas

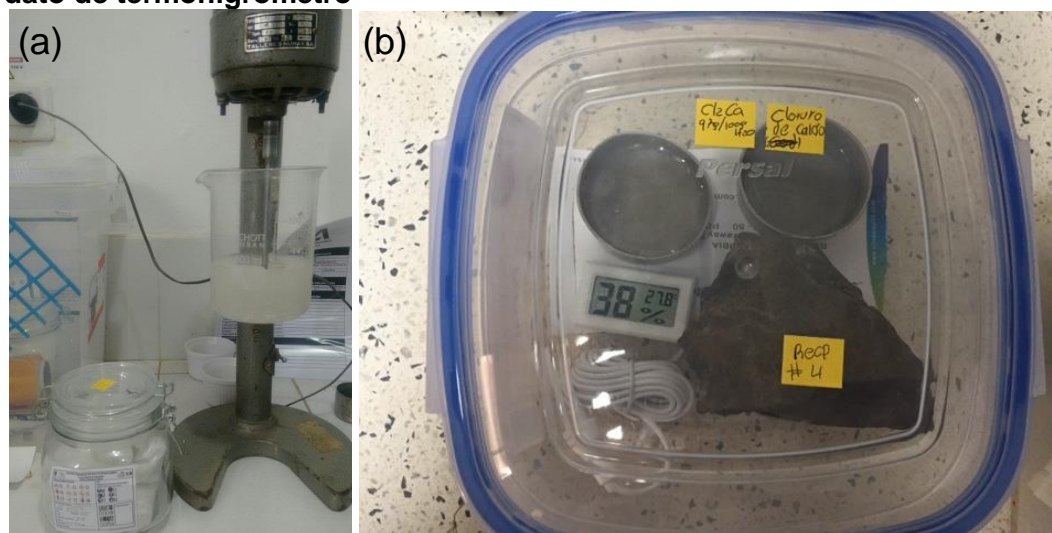
La hidrología de la zona de estudio registró que la humedad relativa HR oscila entre 54 % y 86 %, datos correspondientes de la estación meteorológica de Corinto, la más cercana al lugar de extracción de la roca lodosa, mostrando un cambio de humedad relativa de 32 % entre el tiempo seco (diciembre-marzo) y húmedo (mayo-octubre). Para el presente estudio se fijó realizar cambios de humedad relativa en laboratorio entre los de $44\% \pm 2\%$ para la rama seca y $95\% \pm 2\%$ para la rama húmeda.

Los cambios de humedad se realizaron mediante la Técnica de Equilibrio de Vapor- VET, explicada previamente en el numeral 3.1.2.1. Se usó soluciones salinas dentro del espectro de las soluciones básicas que se ubicaron en la Tabla 9, escogiendo el Cloruro de Sodio (NaCl) para llevar las muestras a la rama húmeda y Cloro de Calcio (CaCl_2) para llevar las muestras a la rama Seca.

La preparación de la solución salina debe tener a disposición el componente químico, agua destilada, vaso precipitado, agitador mecánico, recipiente hermético. La medición de la HR para cualquier ambiente de humedad que se desea imponer y controlar requiere de un termohigrómetro, en este caso se usó un higrómetro de referencia AMPROBE TMA40-A.

El procedimiento consistió en hacer la solución salina con el componente químico y el agua destilada, dentro de un vaso precipitado, agitando hasta disolver completamente, después se vertió el líquido dentro del recipiente hermético. Posteriormente se introdujo el termohigrómetro para registrar los datos de HR hasta que estos no cambiaran; así, se obtuvo la transferencia de vapor en porcentaje de HR la solución química. El anterior proceso es mostrado en la Figura 17.

Figura 17. Imposición de ambiente controlado con Técnica de Equilibrio de Vapor VET. (a) preparación solución salina, (b) Equilibrio de vapor en recipiente hermético con dato de termohigrómetro



Fuente: Autor.

La variación del valor de humedad relativa con respecto al cambio de la temperatura en una solución salina de NaCl es muy baja y despreciable para el desarrollo del presente estudio, disposición verificable con la Figura 8. En contraposición la solución salina a base de CaCl_2 varía ampliamente el valor de HR; por ello, se ejecutaron las pruebas pertinentes para encontrar las concentraciones de CaCl_2 que alcanzaron la humedad relativa de $44\% \pm 2\%$, en los cambios de temperatura experimentales a las que se sometieron las muestras de roca lodosa, correspondientes a 8°C , 20°C y 52°C .

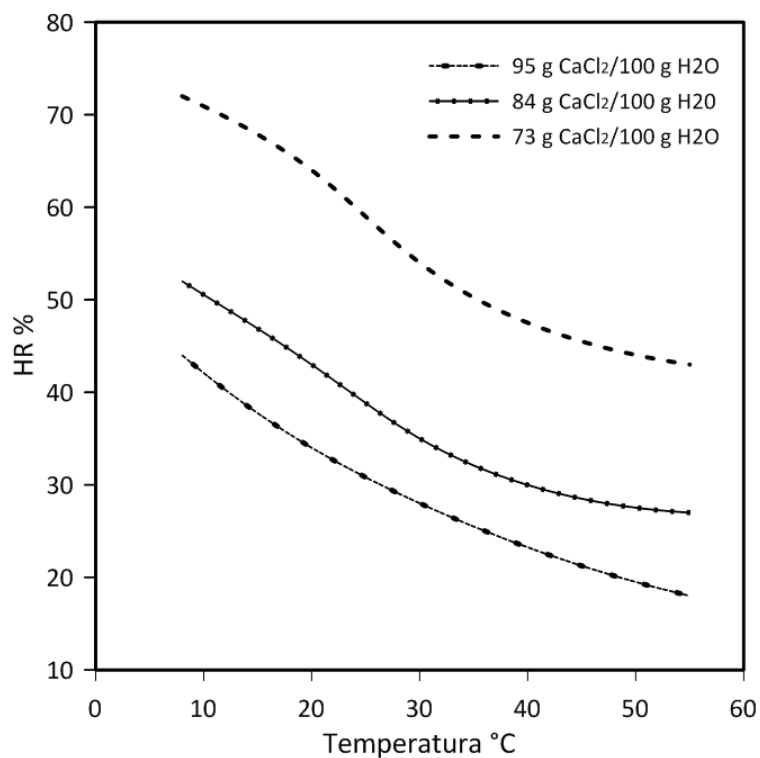
Los compuestos químicos y las concentraciones definitivas para adquirir la rama seca y la rama húmeda, son resumidos en la Tabla 14. Las curvas de concentración de la Figura 18, corresponden a las tres concentraciones de CaCl_2 con las que se logró tener la HR de 44 % en las tres temperaturas de control del posterior proceso experimental.

Tabla 14. Soluciones salinas utilizadas en el proyecto

Compuesto químico	g/100g H_2O	Revoluciones (rpm)	Tiempo agitación (min)	Temperatura a someterse ($^\circ\text{C}$)	HR (%) medida	Succión (MPa) Teórica
NaCl	4	500	3	8-20-52	97	4
	73	800	15	52	44	112
CaCl_2	84	800	20	20	44	112
	95	800	25	8	44	112

Fuente: Autor.

Figura 18. Curva de variabilidad de la HR con respecto a la temperatura para las tres concentraciones de CaCl_2 que cumplieron con el objeto del estudio

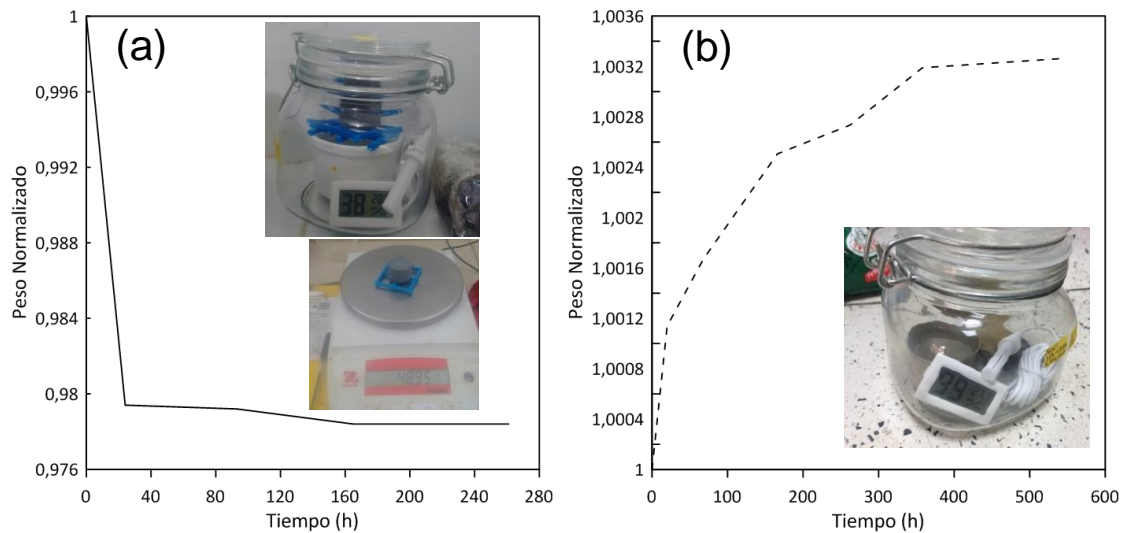


Fuente: Autor.

Luego de definidas las concentraciones de cada solución salinas, fue necesario determinar el tiempo en lograr la transferencia de la humedad de la solución química a la muestra de roca. Para esto, se colocaron muestras de roca lodosa dentro del recipiente hermético con la solución que contenía CaCl_2 (HR de 44%); posteriormente, se registró la variación del peso con respecto al tiempo, cuando la variación del peso en la muestra fuera igual al anterior registro ± 0.02 g, se da por finalizada la prueba.

El mismo proceso se llevó acabo sobre la solución salina de NaCl (HR de 95%), hasta cumplir con la variación de peso menor ± 0.02 g. En la Figura 19, se observa la gráfica del control de variación de peso, estos valores de peso están normalizados con respecto al peso inicial de la muestra.

Figura 19. Variación del peso normalizado con respecto al tiempo. (a) Usando CaCl_2 , (b) de rama seca a rama húmeda usando NaCl



Fuente: Autor

Los resultados de las pruebas detallaron que para las muestras de roca lodosa el tiempo de llevar la humedad de la rama húmeda a la rama seca fue de entre 400 a 550 horas; para fines prácticos, se estableció que el tiempo requerido para el equilibrio de humedad entre la solución salina y la muestra de roca, se logró al cabo de 20 días, valor a tener en cuenta para el diseño y montaje experimental.

Los resultados de los ensayos y pruebas hechos hasta este paraje, permitieron conocer al geomaterial de estudio y alcanzar las pautas a distinguir en el montaje experimental de laboratorio; a fin de, controlar los ambientes de humedecimiento/secado (H-S), calentamiento/enfriamiento (C-E) y acción simultanea de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E), desarrollados en los capítulos posteriores del texto.

4.4 CARACTERIZACIÓN E INCIDENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LA RESISTENCIA DE LA ROCAS LODOSAS.

Producto del montaje y diseño experimental desarrollado para determinar el efecto de los cambios de humedad y temperatura en las rocas lodosas, se realizaron ensayos para el análisis de las características de la roca lodosa frente a los cambios de humedad. La curva de retención de agua CRA y la evaluación de la influencia de la humedad en la Resistencia a la Compresión Uniaxial, fueron dos análisis desarrollados para lograr identificar el comportamiento geomecánico de la roca lodosa ante la modificación de la humedad.

4.4.1 Medición de la succión ante el cambio de humedad en la roca lodosa.

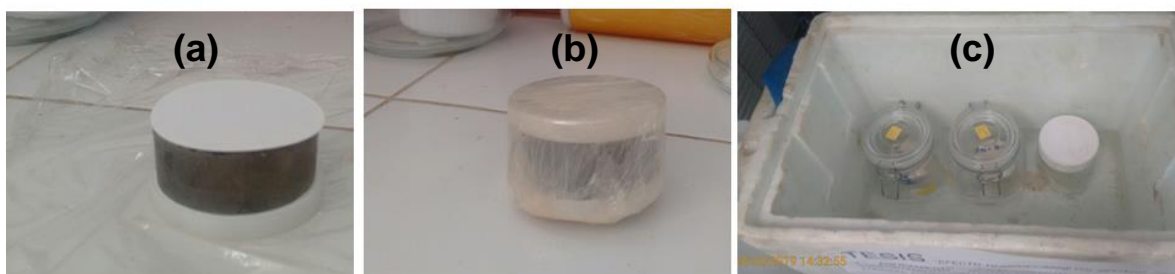
Al incluir los cambios de humedad en las muestras de roca lodosa con la técnica de equilibrio de vapor, surgió la inquietud de conocer el valor de succión que experimenta el material de estudio con la humedad que se registre sobre el geomaterial.

La caracterización de las propiedades de la roca teniendo en cuenta la condición parcialmente saturada, requirió del cálculo del valor de succión con el cambio de porcentaje de saturación del material. Para ello, se calculó la succión en (kPa), usando la expresión propuesta por Chandler et al. (1992) de la Tabla 11. Esta expresión usa el procedimiento de uso del papel filtro Newmat 42 explicado en el numeral 3.1.2.2. El procedimiento en laboratorio para el método seleccionado anteriormente consiste en:

- Se dispuso de una muestra de roca preferiblemente regular cilíndrica de 5 cm de diámetro y 2 cm a 3 cm de espesor, este geomaterial debe contener cierta cantidad de humedad incluida, proceso que se adelantó con la técnica de equilibrio de vapor-VET.
- Seguido, se colocó en contacto el papel filtro con la cara de la roca, y sobre ella un disco acrílico o teflón, realizando el mismo ejercicio con la cara opuesta. Después de tener en contacto la roca y el papel filtro, se envuelve en papel vinipel asegurando presión entre la roca y el disco acrílico.
- Posteriormente de tener sellada la muestra, se aseguró la mínima variación de la temperatura ($\pm 1^\circ \text{C}$); esto se logró, introduciendo la muestra en un recipiente de vidrio sellado, y subsiguiente se colocó dentro de una caja de icopor, también sellándola. En este paso se requirió asegurar que se produzca el equilibrio de transferencia de humedad entre la muestra y el papel filtro.
- Finalmente, después de transcurridos 7 días se extrajo la muestra y los papeles filtros para tomar la humedad de cada uno, con una balanza de precisión de $\pm 0.0001 \text{ g}$. Luego, se secan el papel filtro y muestra de roca en horno a $105^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$ (3 horas papel filtro y 24 horas muestra de roca), para conocer la humedad del papel filtro y la de la muestra de roca.

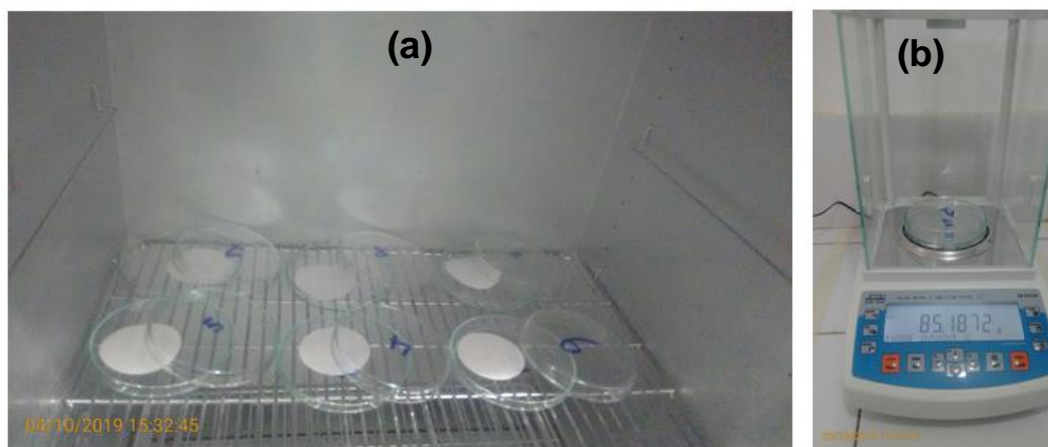
Como recomendación general se tuvo que realizar cada uno de los pasos procurando evitar contaminar el papel filtro, para esto se dispuso de limpieza general en laboratorio, guantes de látex, tapa bocas y pinzas. La Figura 20 y Figura 21, muestran el desarrollo del proceso de medición de succión con el método anteriormente señalado.

Figura 20. Proceso de medición de succión con método de papel filtro Newmat 42. (a) Colocación de papel filtro entre muestra y disco de teflón, (b) muestra envuelta y presionada, (c) control y aislamiento de muestra



Fuente: Autor.

Figura 21. Proceso de medición de succión con método de papel filtro Newmat 42. (a) Secado de papel filtro en horno, (b) balanza de precisión para toma de peso húmedo y seco del papel filtro



Fuente: Autor.

Los resultados obtenidos del peso en el papel filtro y el geomaterial, permitió calcular el valor de succión y la humedad natural a la que la roca experimenta está succión. La Tabla 15 muestra el resumen de resultados del cálculo de succión:

Tabla 15. Resultados de succión con papel filtro, en muestras de roca lodosa

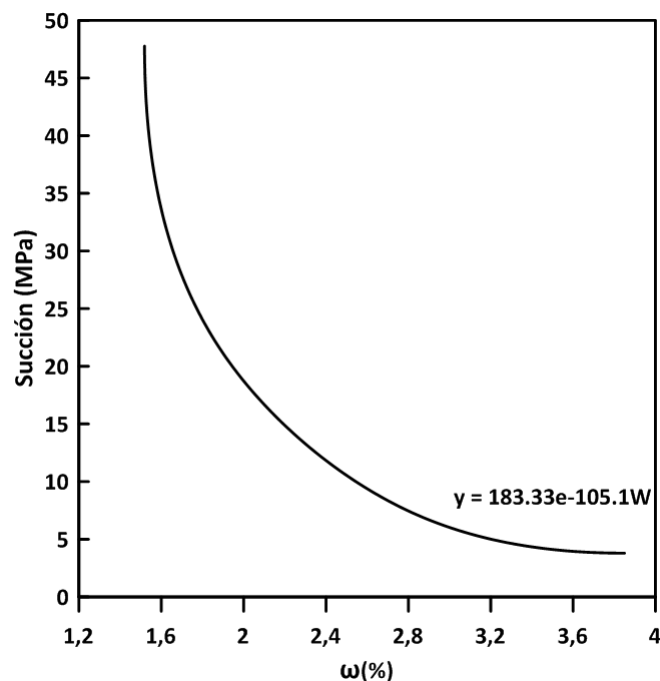
ω Papel-Filtro (%)	Succión (MPa)- Chandler et al 1992	ω muestra (%)
20,30	3,79	3,8%
15,66	7,38	2,8%
8,34	21,12	1,9%
2,62	47,77	1,5%

Fuente: Autor.

Los datos obtenidos en la Tabla 15, permitieron identificar el crecimiento de la succión con la disminución del contenido de agua en la roca. Sin embargo, el método del papel filtro está restringido para la toma de datos de succión en la rama seca; es decir, para muestras con un grado de saturación menor a los aquí calculados, los resultados fueron pocos precisos, esto se debe a que la sensibilidad del cambio de humedad en el papel filtro no permite registrar humedades confiables.

Figura 22 muestra la curva de retención de agua CRA en el tramo húmedo. La construcción completa de la curva de retención de agua, está limitada por el uso del método de papel filtro; por ende, la falta de datos en la rama seca. Sin embargo, el análisis de la incidencia del grado de saturación en la muestra denotó una variable a considerar cuando se investiga geomateriales parcialmente saturados.

Figura 22. Curva de retención de agua CRA en la rama húmeda de la roca lodosa de formación Lutitas de Macanal



Fuente: Autor.

La curva de retención de agua en la parte húmeda permite expresar el valor de la succión con respecto a cada valor de humedad en la roca lodosa objeto de estudio, esta es expresada en la Ecuación 2.

$$\Psi' = 183,33e^{-105,1\omega} \quad [\omega > 1,5] \quad \text{Ec. 2}$$

4.4.2 Influencia de la Humedad (ω) en la Resistencia a la Compresión Uniaxial (σ_c).

Durante la caracterización de la roca lodosa y la ejecución del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial sobre las muestras de referencia (sin tratamientos); se obtuvieron valores de resistencia a la compresión dispersos. Luego de analizada la información y tener en cuenta el papel de la succión en los geomateriales, se realizó el análisis de la influencia de la humedad en la Resistencia a la Compresión Uniaxial de las rocas lodosas. La Tabla 16 da a conocer los resultados de σ_c y ω , de varios núcleos de roca lodosa.

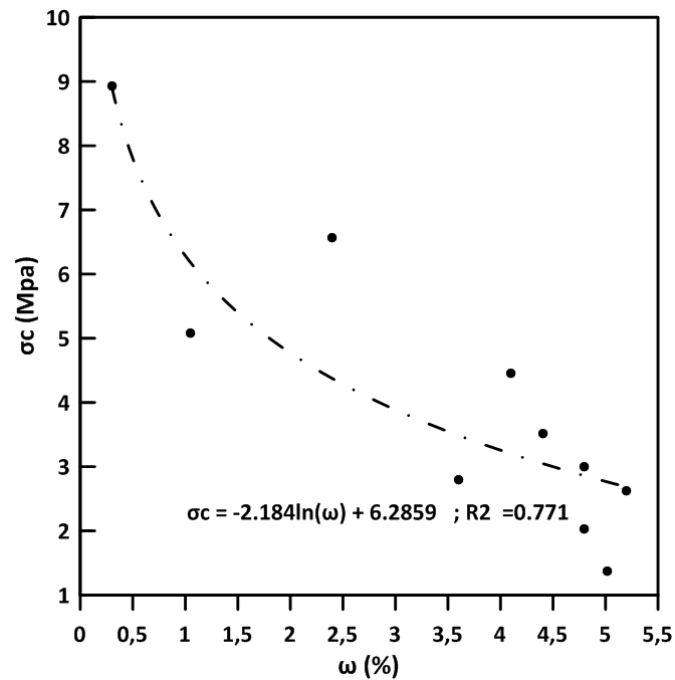
Tabla 16. Resistencia a la Compresión Uniaxial, humedad y saturación en testigos de rocas lodosas, formación Lutitas de Macanal

Núcleo #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ_c (Mpa)	5,08	2,03	2,80	1,38	6,57	3,51	4,45	2,62	3,00	8,93
ω (%)	1,05	4,80	3,60	5,02	2,40	4,40	4,10	5,20	4,80	0,30
Sr (%)	19,10	87,20	65,40	91,20	43,60	80,00	74,50	94,50	87,20	5,50

Fuente: Autor.

Los resultados mostraron que la Resistencia a la Compresión Uniaxial depende del porcentaje de saturación de la roca; en donde, a menor humedad natural del espécimen, mayor la resistencia del geomaterial. Estos resultados son consecuentes con el apartado anterior donde la succión experimentada en el material es dependiente de la humedad de la roca. La Figura 23 expone la variación de la Resistencia a la Compresión Uniaxial con respecto a la humedad natural de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal.

Figura 23. Cambio de la Resistencia a la Compresión Uniaxial con la humedad en la roca lodosa.



Fuente: Autor.

Los datos de la Tabla 16 graficados en la Figura 23 se ajustaron a una función exponencial mostrada en la Ecuación 3, en la que se puede relacionar el valor de Resistencia a la Compresión Uniaxial con respecto a la humedad de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal.

$$\sigma_c = -2.184\ln(\omega) + 6.2859 \quad ; R^2 = 0.771 \quad \text{Ec. 3}$$

Los resultados de la influencia de la humedad en la succión y la Resistencia a la Compresión Uniaxial, permitió identificar que la variable de contenido de agua debió ser controlado en el análisis del geomateriales parcialmente saturados, con la finalidad de disminuir errores en la interpretación de resultados.

5 DISEÑO Y MONTAJE EXPERIMENTAL

Después de considerar la totalidad de la información previa, se logró desarrollar el montaje experimental en laboratorio para los ciclos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento. En este capítulo se resumen las pautas del diseño experimental para el posterior análisis de los resultados del comportamiento ante la resistencia a la compresión uniaxial de las rocas lodosas en los tratamientos sometidos.

5.1 Selección del material de referencia

Se refiere a la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal que fueron extraídos en núcleos cilíndricos, dichos testigos son perfilados a fin de cumplir con el criterio de muestras inalteradas listas para ser sometidas al ensayo de compresión uniaxial, siguiendo la norma ASTM D7012 14e1⁴⁸.

5.2 Montaje experimental de laboratorio

El principal objetivo en esta sección es definir y explicar el montaje en laboratorio para los tratamientos a las rocas lodosas. Los tratamientos corresponden a humedecimiento/secado (H-S), calentamiento/enfriamiento (C-E), y el simultaneo de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E). Cada uno de estos montajes es explicado, a continuación.

Como primicia para el desarrollo metodológico en laboratorio, se consideró que en condiciones naturales los cambios de humedad ocurren entre las estaciones (invierno-verano) y los cambios de temperatura dependen de la insolación por rayos del sol, estos últimos ocurren a diario. Ahora bien, los periodos en el cambio de humedad son más largos en tiempo que los de temperatura, con la finalidad de obtener datos en el mismo lapso, se ejecutaron los cambios de temperatura repetitivamente hasta completar el ciclo de cambios humedad; es decir, el ciclo de cambio de humedad se realizó en 40 días y los ciclos de cambio de temperatura se ejecutaron diariamente repitiéndolos hasta los mismos 40 días del ciclo de humedad.

5.2.1 Tratamiento humedecimiento/secado (H-S)

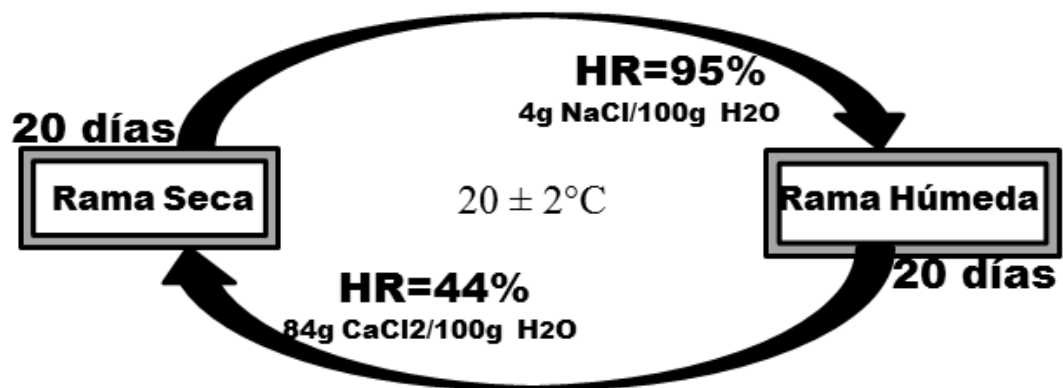
Este tratamiento consistió en aplicar la técnica de equilibrio de vapor VET, logrando la transferencia de vapor entre las soluciones salinas y las muestras de roca lodosa dentro del recipiente hermético. En este montaje se tuvieron dos puntos de humedad a alcanzar, cada uno tardando 20 días; por un lado, está la rama seca con el uso del cloruro de calcio (CaCl_2) para llegar al ambiente de HR

⁴⁸ ASTM D7012–14e1: Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Conshohocken, PA, 2014

de 44 % y por el otro la rama humedad mediante la solución de cloruro de sodio (NaCl) para llegar a HR de 95 %.

Cabe resaltar que el cambio de humedad aquí propuesto se somete a las condiciones de temperatura del laboratorio de suelos de la UPTC, el valor de temperatura es de aproximadamente $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Este montaje es detallado en la Figura 24.

Figura 24. Diagrama del tratamiento de humedecimiento/secado (H-S)

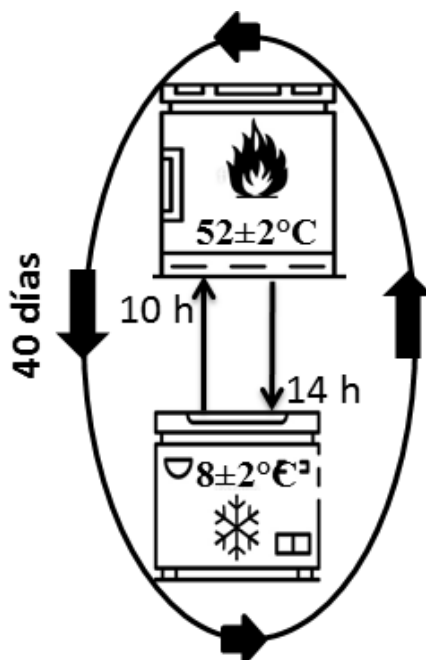


Fuente: Autor.

5.2.2 Tratamiento Calentamiento/enfriamiento (C-E)

Este tratamiento se tuvo con la disposición en laboratorio de nevera y horno, previamente relacionados en la etapa de pre-ensayos, estos equipos permitieron regular y mantener la temperatura constante de las muestras dentro del respectivo recipiente hermético. La temperatura con la que trabajó el horno corresponde a $52^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de la nevera fue de $8^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, el tiempo de las muestras en alta temperatura fue de 10 horas y en baja temperatura fue de 14 horas, completando el cambio diariamente. La repetición del tratamiento se realizó en el mismo periodo de tiempo del ciclo de humedecimiento/secado, es decir 40 días. Si bien, fueron múltiples cambios de temperatura los resultados pudieron ser comparados en el mismo periodo de tiempo con los cambios de humedad. La Figura 25, muestra el tratamiento planteado.

Figura 25. Esquema tratamiento de Calentamiento/enfriamiento (C-E)



Fuente: Autor.

5.2.3 Tratamiento simultáneos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E).

Cometidos los tratamientos individuales de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento, se dispuso al montaje del tratamiento simultáneo de cambios de humedad y temperatura. Como bien se determinó en el capítulo 4.2.3.2 cambios de humedad controlado, la solución salina de NaCl no varía con la con temperatura, lo que significó que dicha solución permite hacer cambios entre el ambiente frío y caliente sin variar significativamente el valor de HR de 95%.

Para alcanzar la humedad de la rama seca (HR de 44%) y realizar al mismo tiempo los cambios de temperatura, se requirió de mantener la misma transferencia de vapor en el recipiente hermético, esto con la ayuda de distintas solución salina de CaCl_2 , según fue el caso de la temperatura a la que se sometió las muestras; ya sea de, 52°C en el horno o 8°C en la nevera. Las concentraciones de CaCl_2 que se usaron son las relacionadas en la Tabla 14. La descripción del montaje experimental que se siguió en este tratamiento es el mostrado en la Figura 26.

Figura 27. Montaje con recipientes herméticos para el control de la humedad en la rama seca (HR de 44%), con cambios de temperatura (8° C a 52° C)



Fuente: Autor.

5.3 Diseño experimental

La investigación que se realizó fue de tipo experimental, buscando encontrar la relación entre los tratamientos de cambio de humedad y temperatura, y la resistencia geomecánica de las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal. Las hipótesis de investigación son de tipo causalidad multivariado, las conjeturas que pretendieron confirmar son:

H1: la resistencia mecánica de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal se reduce por la acción de los ciclos de humedecimiento/secado y enfriamiento/calentamiento.

H2: la incidencia de los ciclos de humedecimiento/secado reduce en mayor proporción la resistencia mecánica de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal, que los ciclos de enfriamiento/calentamiento.

H3: la aplicación de los ciclos de enfriamiento/calentamiento influye en la resistencia mecánica de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal, ante ciclos de humedecimiento/secado.

5.3.1 Variables del diseño experimental y distribución de la muestra

El diseño experimental de esta investigación tuvo en cuenta las variables dependientes e independientes mostradas en la Tabla 17.

Tabla 17. Descripción de las variables dependientes e independientes

Variable	Tipo de Variable	Definición Conceptual	Definición Operativa
HUMEDAD	INDEPENDIENTE	Cantidad de agua que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo.	Humedad: ω (%)
TEMPERATURA	INDEPENDIENTE	La Temperatura es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee	Termómetro ($^{\circ}$ C)
RESISTENCIA GEOMECÁNICA	DEPENDIENTE	La resistencia mecánica es la capacidad de los cuerpos (roca o suelo) para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse	Resistencia a la compresión uniaxial. (MPa).

Fuente: Autor.

Después de definidos los tratamientos a imponer para controlar las variables independientes (temperatura y humedad), se dispuso a distribuir los núcleos de roca lodosa de forma aleatoria en cada uno de los recipientes para los tratamientos, considerando que se ejecutaron dos (2) ciclos de cada tratamiento, en cada uno de ellos se realizó el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial, para determinar la variable dependiente. La distribución y cantidad de testigos de roca se detalla en la Tabla 18. Adicional, se realizó el ensayo de especímenes sin tratamientos, siendo estos las muestras sin referencia.

Tabla 18. Distribución del número de especímenes de roca lodosa, por tratamiento y ciclos

Numero de ciclos acumulados	H-S	C-E	H-S y C-E
1 ciclo	4	4	4
2 ciclos	4	4	4

Fuente: Autor.

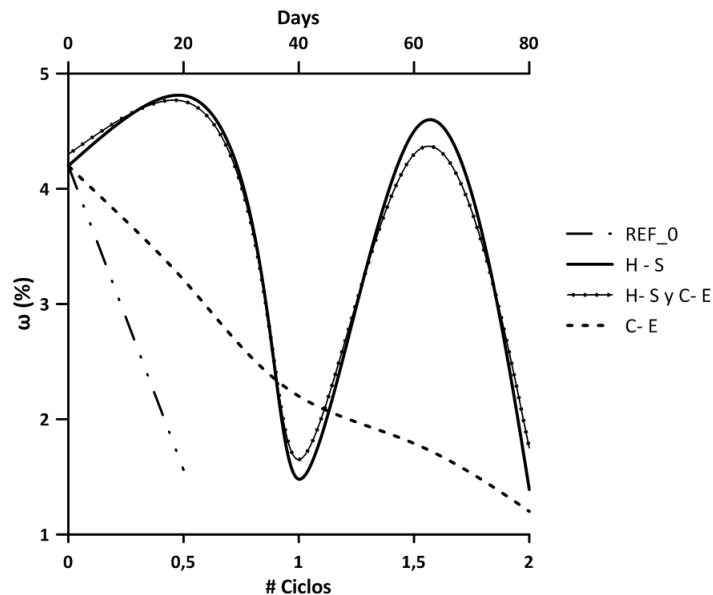
6 RESULTADOS CAMBIOS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA

Luego de establecido el montaje experimental del presente trabajo de investigación, se dispone a presentar los resultados logrados en los cambios experimentales de humedad y temperatura practicados en laboratorio sobre la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal. Inicialmente se darán a conocer las observaciones del montaje experimental y los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial de los tratamientos de humedecimiento/secado (H-S), calentamiento/enfriamiento (C-E) y simultáneos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E). Finalmente se darán a conocer resultados de la curva de retención de agua (CRA) con el método de papel filtro y el análisis de la resistencia a compresión uniaxial con la variación de la humedad, de la roca lodosa.

6.1 CAMBIOS DE HUMEDAD EN TRATAMIENTOS.

Las humedades efectivas que llegaron a haber en las muestras de roca lodosa sometidas a los tratamientos cambios de humedad y temperatura, y la respectiva muestra de referencia, fueron medidas a través de fragmentos de roca que se pesaron y secaron al horno, para conocer el contenido de humedad en la transición de cambios de solución salina. En la Figura 28 se observan los cambios de humedad que sufría cada uno de los tratamientos durante los ciclos a los que estos fueron sometidos.

Figura 288. Variación de humedad en rocas lodosa ante cada tratamiento y ciclo.



Fuente: Autor

La ejecución de todos los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial se realizó cerca en la rama seca o menor humedad a la que se somete cada muestra.

6.2 RESULTADOS DE REFERENCIA

Antes de mostrar los resultados de los tratamientos, se dan a conocer los resultados de referencia, datos que fueron obtenidos como ensayo de resistencia a la compresión uniaxial de muestras cilíndricas de roca lodosa sin tratamientos, siendo esta la condición inicial del geomaterial objeto de estudio. A continuación en la Tabla 19, se muestran los resultados de las muestras de referencia (Ref_0).

Tabla 19. Resultados testigos de referencia (Ref_)

Tratamiento	Humedad (%)	σ_c (MPa)	Promedio σ_c (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Error típico	Et (GPa)	Promedio Et (GPa)
0	1,43	12,609	9,37	3,04	1,15	0,580	0,464
	2,10	6,573				0,340	
	1,33	8,930				0,472	

Fuente: Autor.

Los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial se realizaron en cumplimiento con la norma ASTM 7012 14e1, esta normal estipula que el ensayo de compresión uniaxial debe ejecutarse con una duración de entre 2 y 15 minutos. Los ensayos realizados en esta investigación fueron ejecutados controlando la deformación, la tasa de deformación fue de 0,14 mm/min.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial se obtuvieron entre el rango de duración de 7 a 14 minutos, siendo este un tiempo de prueba ajustado dentro de la margen de la norma ASTM. La resistencia máxima a la compresión uniaxial (σ_c) es la resistencia pico, y el módulo de Young se calcula tangencial al 50 % de la resistencia máxima (Et), en la curva esfuerzo contra deformación.

6.3 RESULTADOS DE TRATAMIENTO PARA CAMBIOS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA

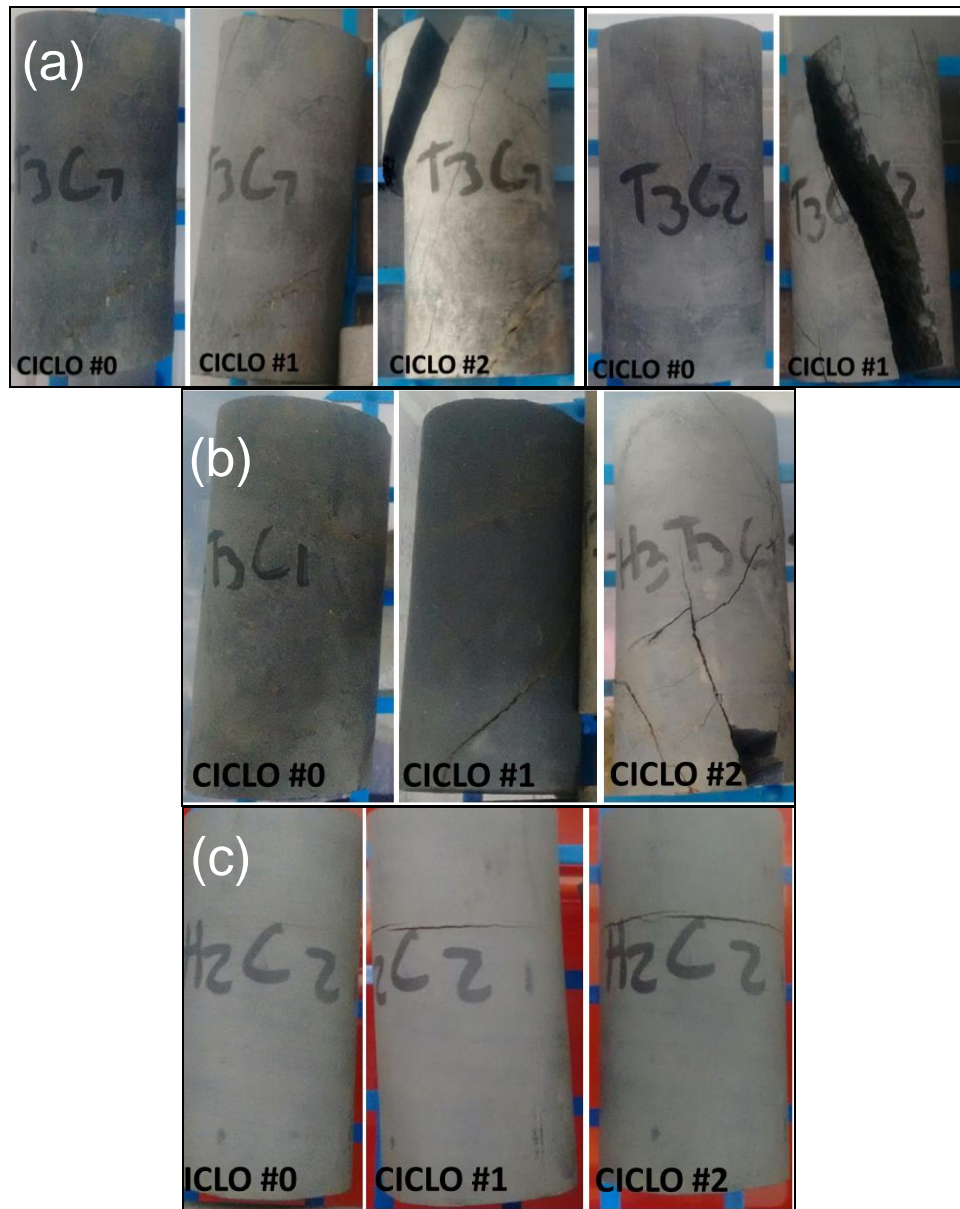
A continuación, se describen los resultados cualitativos y cuantitativos de los tratamientos de humedecimiento/secado (H-S), calentamiento/enfriamiento (C-E) y simultaneo de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E).

6.3.1 Análisis cualitativo de los efectos de los cambios de humedad y temperatura.

Después de realizados los tratamientos H-S, C-E y simultaneo H-S y C-E, se detalló diferencia entre los distintos ambientes que se imponían a cada tipo de muestra. La característica visualmente notoria corresponde a la propagación de

fisuras y fracturas en los especímenes de roca lodosa, las cuales son de mayor intensidad en las muestras sometidas a los cambios de temperatura, en contra posición los especímenes sometidos a cambios de humedad tuvieron muy pocas fisuras. Los resultados cualitativos de los tratamientos y los ciclos pueden ser observados en la Figura 29.

Figura 29. Aumento de las fisuras con los cambios de temperatura. (a) calentamiento/enfriamiento, (b) simultáneo humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento, (c) humedecimiento/secado



Fuente: Autor.

6.3.2 Resultados de cuantitativos de los cambios de humedad y temperatura

De las 24 muestra sometidas a los tratamientos relacionadas en la Tabla 16, se realizaron 21 ensayos de resistencia a la compresión uniaxial; debido a que, tres (3) de los testigos fueron descartados por fracturas pronunciadas o exceso de fisuras, como los mostrados en la Figura 29. Sobre los cilindros de roca lodosa sometida a los tratamientos de H-S, C-E y simultaneo de H-S y C-E, se lograron mínimo 3 ensayos por cada ciclo y/o tratamiento. En la Tabla 20, se dan a conocer los resultados resumen de los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial. Los registros de cada ensayo se pueden en el Anexo 3.

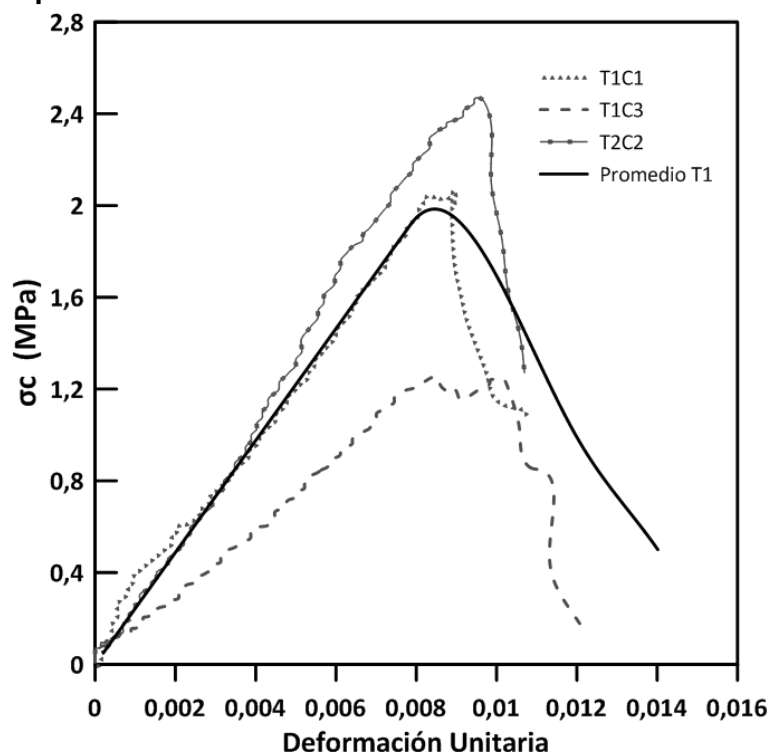
Tabla 20. Resumen de los resultados de los ensayos de resistencia a las compresión uniaxial en tratamientos y ciclos impuestos a la roca lodosa

Tratamiento		Humedad (%)	σ_c (MPa)	Et (GPa)
H-S	Ciclo_1	1,17	7,823	0,516
		1,69	3,475	0,386
		1,27	7,985	0,575
		1,44	8,485	0,314
	Ciclo_2	1,55	2,947	0,307
		1,48	4,248	0,500
		1,23	8,606	0,545
		1,65	3,092	0,180
H-S y C-E	Ciclo_1	1,41	1,435	0,301
		1,75	2,076	0,213
		1,78	7,695	0,348
		1,57	1,938	0,175
	Ciclo_2	1,79	4,309	0,214
		1,67	6,442	0,355
		1,97	1,811	0,210
C-E	Ciclo_1	2,15	2,042	0,245
		2,22	1,255	0,173
		1,57	2,468	0,313
	Ciclo_2	1,20	1,130	0,114
		1,31	1,727	0,229
		1,10	2,264	0,151

Fuente: Autor

Mediante promedio se consiguió un resultado representativo para cada ciclo y/ tratamiento aplicado; así por ejemplo, el ciclo 1 del tratamiento calentamiento/enfriamiento, se obtuvo en la Figura 30.

Figura 30. Curva promedio tratamiento calentamiento/enfriamiento- ciclo 1



Fuente: Autor

En el Anexo 3 se presenta las gráficas correspondientes a los valores promedio realizados de cada uno de los tratamientos y ciclos en este estudio. La Tabla 21 muestra el resumen de los resultados para cada tratamiento y ciclo.

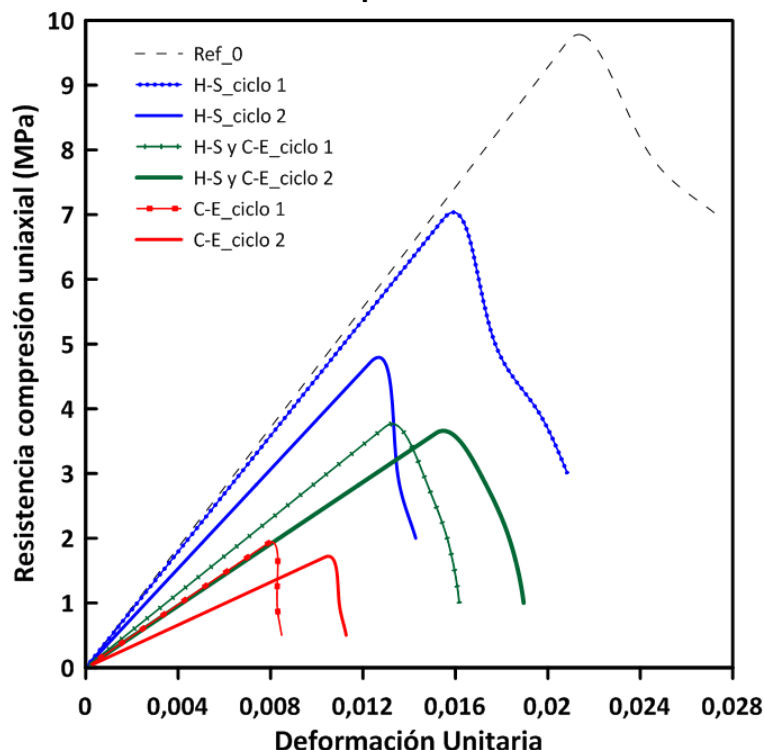
Tabla 21. Resultados resumen de los tratamientos y ciclos

Tratamiento		Promedio σ_c (MPa)	Desviación Estandar (MPa)	Promedio Et (GPa)	Desviación Estandar (GPa)
H-S	Ciclo_1	6,94	2,33	0,45	0,12
	Ciclo_2	4,72	2,65	0,38	0,17
H-S y C-E	Ciclo_1	3,74	3,44	0,29	0,07
	Ciclo_2	3,63	2,20	0,24	0,08
C-E	Ciclo_1	1,92	0,62	0,24	0,07
	Ciclo_2	1,71	0,57	0,17	0,06

Fuente: Autor.

La Figura 31 muestra los resultados de las curvas promedio de resistencia a la compresión vs la deformación unitaria de todos los tratamientos y ciclos ejecutados en este estudio sobre el comportamiento geomecánico de las rocas lodosas ante cambios de humedad y temperatura.

Figura 31. Grafica Resistencia a la Compresión Uniaxial vs Deformación Unitaria.



Fuente: Autor.

La Figura 31 muestran que el tratamiento de calentamiento/enfriamiento es el que más disminuyó en la Resistencia a la Compresión Uniaxial y el Módulo de Elasticidad de la roca lodosa. De igual manera, la tendencia en el aumento de los ciclos disminuye la resistencia del material para cualquiera de los tratamientos. En la Tabla 22, se dan a conocer el porcentaje de degradación de la resistencia de la roca con respecto a la muestra de referencia, relacionada en la Tabla 19.

Tabla 22. Degradación de la resistencia de la rocas lodosas antes ciclos y tratamientos de H-S, C-E y simultaneo de H-S y C-E, respecto a la referencia.

Tratamiento		σ_c % degradación	Et % degradación
H-S	Ciclo_1	25,9	3,5
	Ciclo_2	49,6	17,5
H-S y C-E	Ciclo_1	60,1	38,1
	Ciclo_2	61,3	48,6
C-E	Ciclo_1	79,5	47,5
	Ciclo_2	81,8	64,5

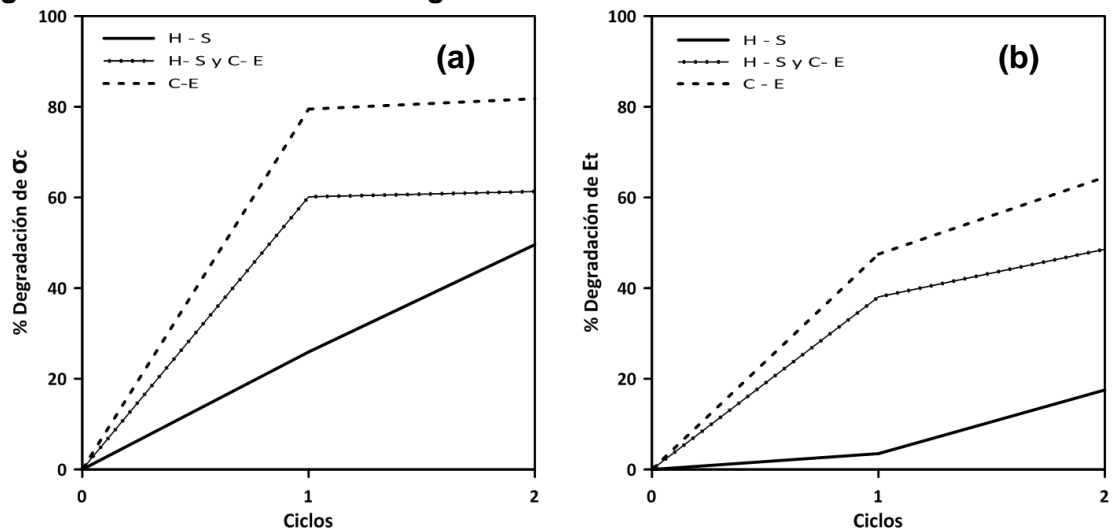
Fuente: Autor.

La degradación de las propiedades geomecánicas como el Módulo de Young (E_t) y la Resistencia a la Compresión Uniaxial (σ_c), fue calculada teniendo en cuenta el valor promedio de σ_c y E_t con respecto al valor de las muestras de referencia. Como se muestra en la Ecuación 4.

$$\% \text{Degradación } (\sigma_c, E_t) = \left(\frac{(\sigma_c, E_t)_{\text{tratamiento y ciclo}}}{(\sigma_c, E_t)_{\text{Ref}_0}} - 1 \right) * 100 \quad \text{EC. 4}$$

El aumento de la degradación de la resistencia del geomaterial con respecto al aumento de los ciclos en cada tratamiento, son mostrados en la Figura 32. Los tratamientos que involucran calentamiento/enfriamiento presentan mayor degradación de la resistencia a la compresión Uniaxial y el Módulo de Young (σ_c y E_t), siendo en el primer ciclo el que registra mayor degradación; por otra parte, el tratamiento de humedecimiento/secado presenta aumento progresivo y constante en la degradación de las propiedades geomecánicas calculadas.

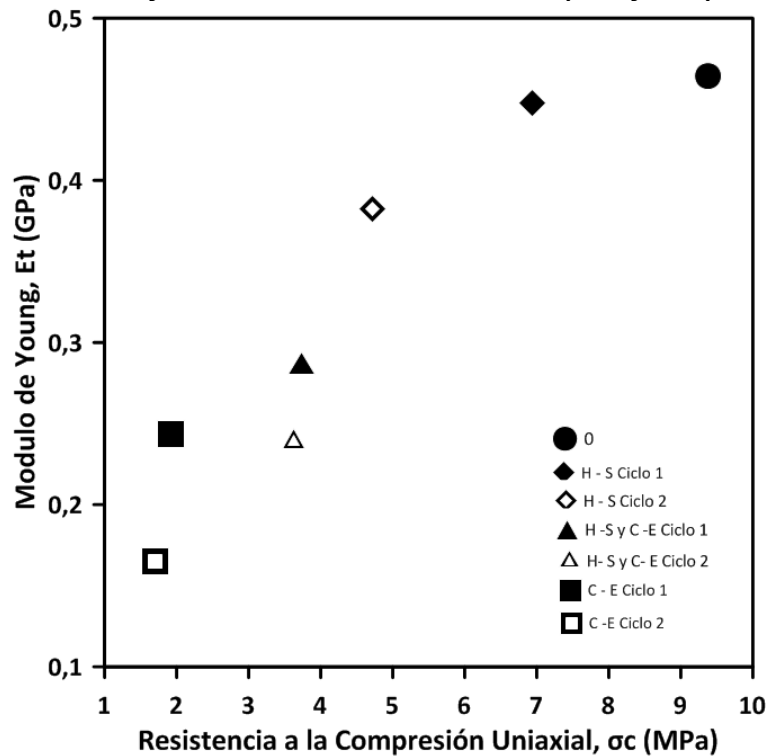
Figura 32. Aumento del porcentaje de degradación en cada tratamiento con el número de ciclos. (a) Degradación de la Resistencia a la Compresión Uniaxila y (b) degradación del Módulo de Young



Fuente: Autor.

La Figura 33 presenta espacialmente la ubicación de los resultados promedio de Resistencia a la Compresión Uniaxial y Modulo de Young en cada tratamientos y ciclos aplicados, además de la muestra de referencia, (muestra 0). Las etiquetas que se alejan del eje de las ordenadas y abcisas corresponde a muestras con mayor resistencia con respecto a los que se acercan al origen, en este caso el promedio de ensayos de mayor resistencia fue la muestra de referencia, contraria al consolidado del tratamiento de C-E con dos ciclos.

Figura 33. Valor promedio de E_t y σ_c para los tratamientos de humedecimiento/secado (H-S), calentamiento/enfriamiento (C-E) y simultáneo de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento (H-S y C-E), ciclo 1 y 2



Fuente: Autor.

La reducción de las propiedades geomecánicas como la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Módulo de Young con la aplicación de los tratamientos de (H-S), (C-E) y simultáneo (H-S y C-E), junto con los ciclos, corresponde a cambios internos del geomaterial, estos se reflejan en aumento del volumen poros, es decir, el espécimen de roca fractura en los contactos entre granos de mineral. El anterior análisis se hace cierto al comparar los resultados cualitativos con los resultados cuantitativos de los tratamientos aplicados, siendo notorio que las muestras que presentaron mayores fisuras (tratamiento de calentamiento/enfriamiento), fueron los especímenes de mayor descenso en la rigidez y resistencia máxima.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las siguientes son las conclusiones obtenidas del presente trabajo de grado.

Se logró reproducir en laboratorio los principales agentes de meteorización física como lo son la humedad y temperatura, convirtiendo el montaje utilizado en una forma aproximada de modelar experimentalmente el ambiente en que se ve sometido los geomateriales en el medioambiente natural; para ello, fue necesario usar equipos de fácil acceso como la nevera y horno, además de las soluciones salinas para aplicar la técnica de equilibrio de vapor, con la que se controló la humedad relativa dentro recipiente hermético.

Se obtuvieron a satisfacción ciclos de calentamiento/enfriamiento (C-E) realizando cambios de temperatura diarios durante 40 días, con 14 horas a 8° C y 10 horas a 52° C, otro tratamiento que con agrado se logró fue el ciclo de humedecimiento/secado (H-S) en 40 días, con 20 días para llegar a la rama húmeda de saturación en 95 % \pm 3 % y 20 días para llegar a la rama seca de saturación en 45 % \pm 3 %. Adicionalmente se aplicaron de forma simultanea los ciclos de calentamiento/enfriamiento y humedecimiento/secado (C-E y H-S), cumpliendo con el propósito de mantener los cambios de humedad y temperatura dentro de un mismo recipiente, ajustando la duración del ciclo igual a los dos tratamientos individuales.

Las rocas lodosas de la formación Lutitas de Macanal fue principalmente afectada por los cambios térmicos, provocando dilatación de minerales con el aumento de temperatura y contracción de los mismo en el enfriamiento, estos generaron los agrietamientos y fisuras, rasgos con mayor notoriedad en los ciclos de calentamiento/enfriamiento (C-E) seguido de los simultáneos de calentamiento/enfriamiento y humedecimiento/secado (C-E y H-S). Por otro lado los ciclos de humedecimiento/secado (H-S) generan alteraciones menores en la roca lodosa, este genoma se entiende por la menor cantidad de minerales susceptibles a cambios de volumen por hinchamiento cuando se humedecen, como lo es el caso del mineral de Montmorillonita que según el estudio de Difracción de Rayos X corresponde al 1 % de la muestra analizada.

En cuento a los resultados de los ensayos, el Módulo de Young mostró una degradación en la respuesta del geomaterial con los tratamientos de calentamiento/enfriamiento (C-E) en 64,5 % al finalizar el segundo ciclo, seguido del tratamiento simultáneo de calentamiento/enfriamiento y humedecimiento/secado (C-E y H-S) de 48,6 %. La menor degradación fue del tratamiento de humedecimiento/secado (H-S) con 17,5 % al cabo de los dos

ciclos. Por consiguiente, se identificó que los materiales que tienen cambios térmicos y de humedad generaron grietas y espacios (poros), que provocaron mayores deformaciones con la carga aplicada. Comparando el material sano (sin tratamientos) fue más intensa el efecto de los cambios térmicos.

De igual manera que al módulo de Young, la Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca lodosa es claramente muy menor en los núcleos sometidos a calentamiento/enfriamiento (C-E) con una degradación del 81,8 % al finalizar los tratamientos y ciclos, seguido del tratamiento simultáneo de calentamiento/enfriamiento y humedecimiento/secado (C-E y H-S) con 69,3 %, y finalmente del tratamiento de humedecimiento/secado (H-S) con 49,6 %.

El aumento de los ciclos de cada tratamiento de cambios de humedad y temperatura degrada la respuesta geomecánica de la roca lodosa en valores como la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Módulo de Young. Para los tratamientos que involucran el proceso de calentamiento/enfriamiento ocurre una mayor degradación en el primer ciclo y disminuye el porcentaje de degradación para el segundo ciclo. Mientras para el tratamiento de humedecimiento/secado la degradación de la resistencia geomecánica aumenta con una pendiente constante entre ciclos.

Exponer la roca lodosa en un ciclo de calentamiento/enfriamiento (insolación/enfriamiento) evaluado en el mismo periodo de tiempo de un ciclo de humedecimiento/secado (invierno/verano), evaluado en 40 días para este estudio experimental, resulta ser el cambio de temperatura el que genera con mayor intensidad el aumento de poros y disminución de las propiedades geomecánicas.

La combinación de los tratamientos de humedecimiento/secado y calentamiento/enfriamiento no generan acumulación de la degradación de la resistencia geomecánicas evaluadas (E_t y σ_c). Siendo que los resultados son intermedios entre los cambios de humedad y temperatura por individual.

El cambio de humedad y temperatura en la roca lodosa genera efectos meramente mecánicos, como es la degradación de Resistencia a la Compresión Uniaxial y Módulo de Young. No se obtuvieron cambios en propiedades físicas y químicas, como es el caso del índice de desleimiento, este tipo de propiedades índice son dependientes de la mineralogía y la génesis del geomaterial; los tratamientos aquí impuestos no son lo suficientemente intensos para modificar la fábrica y estructura de la roca.

La zona de estudio y en general el medio geológico Colombiano, está fuertemente afectado por fallas locales que desplazan los geomateriales y lo particionan en miles de macizos rocosos. Para un sitio de estudio esto implica la reducción de resistencia geomecánica in-situ, adicionalmente las rocas lodosas son materiales

que degradan su resistencia cuando la somete y expone a cambios de humedad y temperatura, efecto que incrementado con la intervención de meteorización química en los planos de diaclasas, degradando con mayor facilidad el macizo rocoso. En la formación Lutitas de Macanal se observa debilidad de los taludes, generando desprendimientos retrogresivos de roca con la acción dinámica de los cambios de humedad y temperatura. La interpretación con base en los resultados experimentales y a lo observado en taludes de la zona de estudio permite ver que el sector es metaestable; por ello, se debe se recomienda evitar la incidencia de la meteorización física que dinamiza y/o modifica la resistencia del geomaterial.

La humedad varía la resistencia mecánica de la roca lodosa, generando mayor Resistencia a la Compresión Uniaxial con la disminución de la humedad en la muestra, entendiéndose la humedad como porcentaje de saturación del material. Este análisis se ajusta a lo observado en la rama humedad de la curva de retención de agua, donde la disminución de la humedad aumenta la succión.

Las siguientes son recomendaciones producto del presente trabajo de grado.

El tratamiento de calentamiento/enfriamiento trata de representar el efecto de la insolación/enfriamiento en la roca lodosa expuesta en campo durante el día y la noche, siendo necesario corroborar estos efectos con datos de campo y ajustar a los cálculos.

El tratamiento de cambios de temperatura, mostró que la degradación de la resistencia evaluada en el mismo periodo de los ciclos de humedecimiento/secado, es de mayor impacto. Se requiere ejecutar el análisis de del tratamiento de calentamiento/enfriamiento considerando periodos de tiempo menores a los aquí impuestos, y armar la curva de degradación de comportamiento geomecánico de la roca lodosa con múltiples valores de ciclos contra resistencia del material.

La reproducción de los cambios de humedad y temperatura en laboratorio, es abordada bajo la premisa de que los agentes de meteorización física, están produciendo pérdida de banca en los taludes expuestos de la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal. Escalar estos efectos requiere de comprobar en la megaescala el efecto de los agentes medioambientales, ajustando el comportamiento estimado en laboratorio con el del macizo rocoso.

Los ciclos de humedecimiento/secado con la técnica de equilibrio de vapor, fue un método para proporcionar la saturación parcial del material y quitar la misma, dejando de lado el uso de tratamientos bruscos de inmersión en agua y secado al horno en 24 horas, método que genera cambios abruptos por las temperaturas de trabajo, el tiempo de exposición y cantidad de agua ganada o perdida, estos tratamiento no corresponden al experimentado por los geomateriales en campo;

ya que en, montañas y laderas del trópico Colombiano se registran las estaciones de invierno y verano, además de las temperaturas de insolación en el día y de disminución de calor en la noche.

Producto de los análisis realizados en este estudio, para posteriores diseños experimentales sobre la influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico de rocas, es indispensable controlar la humedad de las muestras a fin de tener la certeza en la aplicación y control de esta variable en el proceso experimental.

Los resultados aquí encontrados son ejemplo del uso de la técnica de equilibrio de vapor y cambios de temperatura para la roca lodosa de la formación Lutitas de Macanal, si bien se comprueba el efecto negativo de los cambios de humedad y temperatura en los geomateriales, es importante solo aplicar el concepto de degradación de resistencia geomecánica, realizando estudios de detalle para evaluar esta degradación de resistencia en cada material rocoso.

Se debe hondar en el conocimiento del material parcialmente saturado, en especial de la roca lodosa, sumamente importante para determinar y conocer la incidencia de la succión en la resistencia de estos geomateriales.

8 BIBLIOGRAFÍA

ALARCON Adolfo. Tesis de pregrado en Ingeniería civil. Bases para el estudio geotécnico de Lutitas en Colombia. Universidad Nacional de Colombia 1976.

ALARCON Adolfo. Introducción a la geología con ejemplos de Colombia, INGEOMINAS, 2001, pp 41.

ASTM D7012–14e1: Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Conshohocken, PA, 2014

BARCEINAS A, JUÁREZ Hernández. Ciencia e ingeniería de los materiales – Capítulo 3: Ordenamiento atómico de los sólidos. J.D.O. 2002

BJERRUM L. Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. En Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 93 (SM5): 1967. pp. 3-49.

BICALHO K, et al.. Filter paper method of soil suction measurement. En: Panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 13. Isla Margarita, Venezuela, 2007.

CHO G, SANTAMARINA J. Unsaturated particulate materials—particle-level studies. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 1. 2001 pp. 84-96

CORREA Álvaro. Serie completa de los métodos recomendados por la ISMR para la caracterización de rocas en laboratorio. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá. 2013. pp 387.

DEERE D, PATTON F. D. Slope stability in residual soil. En: Fourth Panamerican Conference. 1976. pp. 88-118

FLOREZ Antonio. Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2003.

FREDLUND D, XING A, FREDLUND M, BARBOUR S. The relation ship of unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. En: Canadian Geotechnical Journal, 32: 1995. pp. 440-448.

GONZÁLEZ Luis. Ingeniería geológica. Meteorización en rocas. Madrid. 2002. pp 135.

HOEK Evert. Practical rock engineering. Rock mass classification. Canada. 2006. Tomo 1. pp 1-11.

INGEOMINAS. Geológica del cuadrángulo K12 de Guateque. Informe 1701, 18p. Boletín Geológico.(1976).

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Consultado en octubre de 2018. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>.

KRUMBEIN W, SLOSS L. Stratigraphy and sedimentation., 2nd edition (Freeman, San Francisco). 1963

MARINOS Paul, HOEK Evert. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Canada. 2002.

MEAD, W. Engineering geology of dam sites transactions. 2nd International Congress of Large Dams. International Committee on Large Dams. Paris. 1936. pp. 171-192

MELO Xiomara. Tesis de maestría en geotecnia. Influencia de la succión en la resistencia al corte de suelos reconstituidos derivados de rocas lodosas. Bogotá. 2010. pp 54

MOJTABA, Heidari et al. Application of fuzzy inference system for determining weathering degree of some monument stones in Iran. En: Journal of Cultural Heritage .2017.

MONTERO J, TORRES M, PALOMINO C, CORTÉS R. Rocas lodosas de la cordillera oriental de Colombia. XIII Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia. Manizales (Col), 21-25 de septiembre de 2010. ISBN 978-958-98770-2-9, pp. A3-1 - A3-63.

POTTER P et al. Mud and mudstones, introduction and overview. Springer. ISBN 3-540-22157-3, New York (USA) 2003.

RIDLEY A. The measurement of soil moisture suction. PhD Thesis, University of London. 1993.

RIDLEY A, BURLAND J. Measurement of suction in material which swell. En: Applied Mechanics Reviews, Vol. 48, No. 10. 1995. pp. 727-732

RODRÍGUEZ Edgar. Tesis de maestría en geotecnia. Evaluación del comportamiento geomecánico de arcillas en el sector de Campo Alegre- ciudad de Barranquilla. Universidad Nacional de Colombia. 2014. Bogotá.

ROMERO E. Controlled-suction techniques. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. W.Y.Y. Gehling & F. Schnaid (eds.). Porto Alegre, Brasil. 2001: pp. 535-542.

TANG A, CUI Y. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. En: Canadian Geotechnical Journal 42: 2005 pp. 287–296.

TARBUCK. Ciencias de la Tierra, Rocas sedimentarias. BLS, 1998, pp 204-205.

TORRES Mario. Tesis de doctorado en ingeniería- geotecnia. Efecto de los ciclos de carga- descarga y humedecimiento- secado en el comportamiento geomecánico de rocas lodosas de los Andes Colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2011, pp I-16.

TORRES M. Síntesis del estado del conocimiento sobre el comportamiento esfuerzo–deformación y degradabilidad de rocas lodosas. VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas, Sociedad Colombiana de Geotecnia – ISRM. Cartagena (Col), ISBN 958-33-9677-X. 2006. pp. 477-491

TORRES-SUAREZ M C, ALARCON-GUZMAN A and BERDUGO-DE MOYA R 2014. Effects of loading–unloading and wetting–drying cycles on geomechanical behaviors of mudrocks in the Colombian Andes EN: J. Rock Mech. Geotech. Eng. junio 2014.Vol 6. p 257–6

VERGARA, M. y TRIANTAFYLLIDIS T. Swelling behavior of volcanic rock under cyclic wetting and drying. En: Internacional Journal of Rock Mechanics y Mining Sciences, Agosto, 2017. Vol 80. P 231-240.

WEN, Hua et al. Experimental investigation on the effect of wetting/drying cycles on mixed mode fracture toughness of sandstone. En: Internacional Journal of Rock Mechanics y Mining Sciences. 2017. vol 93. p. 242-249.

ZHANG B; ZHANG, J y SUN, G. Deformation and shear strength of rockfill materials composed of soft siltstones subjected to stress, cyclical drying/wetting and temperature variations. En: Engineering Geology. Marzo, 2015. vol. 190. p 87-97.

ZHANG D. et al. Quantitative determination of the effect of temperatura on mudstone decay during wet-dry cycles: a case study of “purple mudstone” from south – western China. En: Geomorphology. Junio, 2015. Vol. 246. P 1-6

ZHAO Y et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain. En: Constr. Build. Mater. Diciembre 2018. Vol 191. pp 923–31

ANEXOS

Anexo 1. Ensayos de caracterización física

Anexo 2. Ensayos de caracterización mineralógica

Anexo 3. Ensayos de resistencia a la compresión uniaxial

Anexo 4. Registro Fotográfico